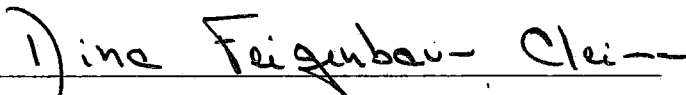


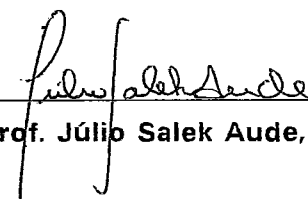
*Antenor Augusto de Carvalho*

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DE PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Dina Feigenbaum Cleiman, D. Sc.  
(Presidente)

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Alaíde Pellegrini Mammana, D. Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Júlio Salek Aude, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, R.J. - BRASIL  
AGOSTO DE 1991

CARVALHO, ANTENOR AUGUSTO DE

Optoeletrônica e Fotônica: Um Estudo Prospectivo  
para o Brasil [Rio de Janeiro] 1991

XI, 128 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,

Engenharia de Sistemas, 1991)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro,

COPPE

1. Optoeletrônica I. COPPE/UFRJ II. Título  
(série).

Para Ian

Agradecimentos:

A grande responsável pela finalização desta tese chama-se Dina. A ela, toda minha admiração, respeito e gratidão pelo seu apoio no trabalho de orientação desta dissertação. Qualquer coisa que escrever ainda é pouco.

Aos professores Júlio Salek Aude e Alaíde Mammana agradeço a honra que me deram ao participar da banca de defesa e às sugestões recebidas.

A Antônio Carlos Bordeaux Rego, pelo imenso apoio, boa vontade e bons papos.

A minha namorada pelo apoio e "puxões de orelha" sempre que o ritmo de elaboração deste trabalho caía abaixo do desejado e a conceber nosso filho, a quem dedico de todo o coração esta tese.

A meus pais e minha avó, sempre presentes.

A Clevis, pelo apoio logístico.

A todas as pessoas da COPPE, NCE, CPqD, PUC, Embratel e Asga que, de uma forma ou de outra, ajudaram na elaboração desta tese.



Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

OPTOELETRONICS AND PHOTONICS: A PROSPECTIVE STUDY FOR BRAZIL

Antenor Augusto de Carvalho

July, 1991

Thesis Supervisor: Prof. Dina Feigenbaum Cleiman

Department: Systems and Computational Engineering

This thesis attempts to describe a study towards the optoelectronics semiconductors and photonic devices segments. We analyse the basic concepts of technological trajectory and paradigm, technological prospection, analysis of tendencies and their impact. Then we describe basic technical concepts of optoelectronics and photonics, their applications, the impacts derived from the diffusion of these technologies and, finally, the development of these technologies in Brazil, closely related to the policies of communications and semiconductors.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

OPTOELETRÔNICA E FOTÔNICA: UM ESTUDO PROSPECTIVO PARA O  
BRASIL

Antenor Augusto de Carvalho

Julho de 1991

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dina Feigenbaum Cleiman

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Esta dissertação procura descrever um estudo voltado para o segmento de semicondutores optoeletrônicos e componentes fotônicos. São abordados os conceitos de trajetória e paradigma tecnológicos; prospecção tecnológica, análise de tendências e seus impactos; conceitos técnicos básicos de optoeletrônica e fotônica; aplicações e impactos da difusão destas tecnologias e finalmente desenvolvimento destas tecnologias no Brasil, intimamente ligada à política de semicondutores e telecomunicações.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - Introdução.....	1
CAPÍTULO II - Paradigmas, Difusão e Convergência.....	5
II.1 - Paradigma e Trajetória.....	5
II.2 - Nascimento, Vida e Morte de um Paradigma.....	10
II.3 - Sistemas Tecnológicos e Inovações Tecnológicas.....	13
II.4 - Lógica e Previsibilidade de um Sistema Tecnológico.....	18
II.5 - Difusão.....	22
II.6 - A Difusão e seu Insumo Chave-chave.....	29
II.7 - Impactos do Processo de Difusão da Microeletrônica.....	33
II.7.1 - Contexto Econômico.....	33
II.7.2 - Organização e Informatização da Produção.....	37
II.8 - Convergência Tecnológica.....	42
CAPÍTULO III - Tecnologia.....	45
III.1 - Componentes Eletrônicos.....	45
III.2 - Optoeletrônica e Fotônica.....	50
III.3 - Dispositivos Optoeletrônicos e Fotônicos.....	50

III.3.1 - Lasers.....	52
III.3.1.1 - Princípios de Funcionamento.....	53
III.3.1.2 - Tipos.....	57
III.3.1.3 - Lasers Semicondutores e LED's.....	60
III.3.2 - Fotodetectores.....	70
III.3.3 - OEIC's.....	74
III.3.4 - Circuitos Integrados Ópticos.....	80
III.3.4.1 - Elementos e Dispositivos de um Circuito Fotônico.....	85
III.3.4.2 - Biestabilidade Óptica.....	90
III.3.5. - Fibras Ópticas.....	96

CAPÍTULO IV - Aplicações da Optoeletrônica e Fotônica.....	105
IV.1 - Setor de Telecomunicações.....	105
IV.1.1 - Breve Histórico.....	107
IV.1.2 - Vantagens e Aplicações.....	111
IV.2 - Setor de Computação.....	115
IV.2.1 - Breve Histórico.....	116
IV.2.2 - Lógica Através da Óptica.....	118
IV.2.3 - Níveis de Conexão Óptica.....	120
IV.2.4 - Elementos Ativos e Passivos.....	125
IV.2.5 - O Papel da Holografia.....	126
IV.2.5.1 - Como Funciona.....	126
IV.2.5.2 - O Que Se Pode Fazer Com Ele.....	127
IV.2.6 - O Papel dos SLM's ("Spatial Light Modulators").....	129

IV.2.7 - Displays .....	133
IV.2.8 - Armazenamento Óptico.....	142
IV.2.8.1 - Discos Apenas para Leitura.....	142
IV.2.8.2 - Discos Graváveis Apenas Uma Vez (WORM).. .....	144
IV.2.8.3 - Discos Apagáveis Regraváveis.....	145
IV.2.8.4 - Tendências.....	149
IV.3 - Setor de Entretenimento.....	152
IV.4 - Aplicações Militares.....	156
IV.5 - Aplicações em Medicina.....	159
IV.6 - Aplicações em Instrumentação.....	161
CAPÍTULO V - O Setor no Brasil.....	165
V.1 -Introdução.....	165
V.2 - As Políticas Para o Complexo Eletrônico...167	
V.3 - Breve Histórico do Setor de Dispositivos Optoeletrônicos.....	177
V.4 - Atividades de P&D em Universidades e Centros de Pesquisa.....	180
V.5 - Cenário Presente.....	186
V.5.1 - Dispositivos Semicondutores Compostos...186	
V.5.2 - Fibras Ópticas.....	190
V.5.3 - Dispositivos de Cristal Líquido.....	194
V.5.4 - Outras Iniciativas.....	195
CAPÍTULO VI - Conclusões.....	197
V.1 - Trajetória da Optoeletrônica e Fotônica versus Microeletrônica.....	199

V.2 - Cenários Previsíveis.....	203
V.3 - Comentários Finais.....	207
CAPÍTULO VII - Referências Bibliográficas.....	214

## I. Introdução

Esta dissertação procura descrever um estudo voltado para o segmento de semicondutores optoeletrônicos, uma das famílias de componentes pertencentes ao universo da microeletrônica, e dos componentes fotônicos. Optoeletrônica é a parte da física destinada ao estudo do comportamento de dispositivos emitem, detectam ou modifiquem radiações luminosas estimulados por sinais elétricos ou convertem radiações luminosas em sinais elétricos, de forma ativa ou passiva. A optoeletrônica, que "a priori" estaria somente ligada a estes dispositivos processadores e transdutores, responsáveis pela conversão de energia luminosa (fótons) em elétrica (elétrons) e vice-versa, na prática está intimamente associada aos elementos que têm por função conduzir e processar sinais luminosos e os elétricos. Os sinais luminosos geralmente são conduzidos através de fibras óticas, guias de onda, lentes, etc. Os sinais elétricos (mais especificamente sinais eletrônicos) são conduzidos e processados através de circuitos cujos elementos básicos são transistores, capacitores e resistores. Ao longo desta dissertação apresentaremos estes componentes. Nossa análise se concentrará nos elementos que se encontram na fronteira entre os fótons e os elétrons: os lasers (nome derivado de "light amplification by stimulated emission of radiation") e os fotodetectores.

Vê-se, portanto, que a optoeletrônica é uma espécie de

"zona cinzenta", um domínio híbrido onde temos de um lado a fotônica e de outro a eletrônica. Limitaremos nosso universo de análise aos setores menos explorados em literatura: a fotônica e, principalmente, a optoeletrônica.

A fotônica é a tecnologia de geração e tratamento de luz e outras formas de energia radiante cuja unidade básica é o fóton. A fotônica abrange desde geração de energia e detecção de luz até comunicações e processamento de informações.

A utilização crescente de tecnologias que envolvem a geração, tratamento ou conversão de sinais luminosos em diversos setores econômicos nos indica a evolução de algumas trajetórias do paradigma tecnológico da microeletrônica. Os conceitos de trajetória e paradigma tecnológicos, que serão explicados posteriormente, permitem uma análise mais clara das diversas formas com que se dá a difusão de determinadas inovações e, particularmente, de como estas inovações contribuem para a resolução de alguns problemas tecnológicos. Em última análise, a resolução destes problemas leva ao ajuste de diversas diferenças e/ou complementaridades existentes entre algumas trajetórias tecnológicas, aumentando as possibilidades de maior difusão de determinada tecnologia e, portanto, levando à evolução do paradigma a que está relacionada. A chamada convergência tecnológica é uma consequência da evolução de algumas destas trajetórias em torno de uma paradigma específico.

A partir desta linha de raciocínio, estabeleceremos



determinados "cenários tecnológicos" associados à tecnologia optoeletrônica, fazendo um trabalho de prospecção tecnológica, análise de tendências e seus impactos.

O desejo de realizar este estudo surgiu de algumas discussões efetuadas na COPPE sobre as diversas tendências existentes na área de semicondutores microeletrônicos. É notória a abundância de literatura sobre microeletrônica. Muitas vezes esta literatura é pouco clara no que se refere à evolução de suas ramificações, como a optoeletrônica. Este estudo se propõe a preencher algumas lacunas existentes nesta documentação.

As questões relativas à difusão tecnológica do paradigma microeletrônico e sua trajetória optoeletrônica encontram-se discutidas no segundo capítulo.

Uma apresentação sumariamente técnica da optoeletrônica é feita no terceiro capítulo. Através desta abordagem técnica procuramos embasar e complementar as considerações sobre sua evolução e aplicações, efetuadas ao longo desta dissertação.

No quarto capítulo exploramos as diversas aplicações de componentes optoeletrônicos, suas relações com os conceitos de difusão, convergência tecnológica assim como os impactos destas aplicações numa sociedade informatizada.

O desenvolvimento desta tecnologia no Brasil, intimamente ligada à política de semicondutores e telecomunicações, é tratado no quinto capítulo. Nesta capítulo discutimos ainda os mercados a serem atingidos por

este tipo de tecnologia e uma breve análise das características do "negócio da optoeletrônica", como são estruturadas empresas que têm como principal atividade a fabricação de componentes e/ou equipamentos optoeletrônicos.

## CAPÍTULO II - PARADIGMAS, DIFUSÃO E CONVERGÊNCIA

Os conceitos de paradigma e trajetória tecnológica serão explicados de forma simplificada neste capítulo, assim como os conceitos de evolução, difusão e convergência tecnológica. Veremos que todos estes conceitos estão, de uma forma ou de outra, relacionados entre si através de algumas variáveis comuns. Em nosso caso particular, ilustraremos estes conceitos e variáveis através do universo de componentes semicondutores microeletrônicos, no qual está contido o subconjunto de componentes optoeletrônicos.

Cumprе ressaltar que a apresentação e desenvolvimento dos diversos conceitos envolvidos inevitavelmente sofrem de um certo grau de generalização, necessária para uma análise mais clara e conclusiva.

### II.1 - Paradigma e Trajetória

Segundo o Dicionário Aurélio, paradigma significa "modelo, padrão, estalão". Tecnologia seria um metodologia técnica para o atingimento de um objetivo previamente estipulado através de um conjunto de conhecimentos diversos que se aplicam a um determinado ramo de atividade. Desta forma um paradigma tecnológico seria um padrão balizador de um conjunto de tecnologias aplicadas a um determinado ramo de atividade. É através deste padrão que as sociedades procuram seu desenvolvimento. Longe de existir um paradigma permanente, que esteja sendo utilizado há séculos, o que efetivamen-

te ocorre é que vários paradigmas se sucedem ao longo da história devido à evolução tecnológica, social, econômica e mesmo política. Os critérios de nascimento, amadurecimento, apogeu e decadência dos paradigmas serão abordados neste e nos próximos itens deste capítulo. Para avaliarmos com maior segurança como se dá a evolução dos paradigmas, como eles se inserem no tecido produtivo e como sua difusão afeta a sociedade necessitamos detalhar alguns dos conceitos envolvidos.

Segundo Dosi, G., citado por C. Heller [1] "o paradigma tecnológico é entendido como um programa de pesquisas tecnológicas que obedecem a um modelo ou padrão de solução de um conjunto de problemas tecnológicos selecionados, problemas estes derivados das ciências naturais e tecnologias também selecionadas, e que define o campo de pesquisa, os problemas a serem selecionados, os procedimentos, as metas e as direções a serem seguidas, bem como as que deverão ser negligenciadas. A evolução do paradigma é entendida como a resolução dos 'trade-offs' técnicos e econômicos, a partir da seleção de diferentes trajetórias tecnológicas (substitutas ou complementares entre si) entendidas como atividades normais de resolução de problemas definidos pelo paradigma. A evolução das trajetórias é vista como o aperfeiçoamento (ou deslocamento dos limites) dos 'trade-offs'."

Em que pese a densidade temática do parágrafo anterior, podemos vislumbrar que a evolução de um paradigma se dá através da resolução de problemas tecnológicos provocados pela pressão de diversos elementos impulsionadores de inova-

ções, ligados ao sistema tecnológico vigente. Estes problemas surgem devido a uma série de compromissos relacionados aos processos de inovação tecnológica presentes nos setores demandante e ofertante. É natural que a busca de inovações provoque o aparecimento de problemas tecnológicos e desafios de diversos tipos e que acarretem a melhoria do desempenho geral de todos os sistemas e equipamentos que utilizem a tecnologia que está sendo aprimorada. Todos querem, por exemplo, um computador que seja mais rápido, mais barato, compacto e que tenha uma boa interface com o usuário, utilizando uma tela de alta resolução. A obtenção de todas estas metas não se dá de forma instantânea, evidentemente: é preciso que se descubram novas formas de se obter este tipo de "máquinas ideais" através de novos métodos de produção, do desenvolvimento e comercialização a preços suportáveis de novos componentes, etc. Todos estes requisitos, que são apenas uma pequena parte de todas as pressões evolutivas a que está submetido um paradigma tecnológico, exigem a resolução de vários problemas.

As respostas a estes problemas estão relacionadas às metas tecnológicas tidas como de obtenção desejável. Por exemplo: no paradigma associado ao ramo de atividade "componentes microeletrônicos" existem metas de redução do tamanho dos componentes, aumento da velocidade de operação, etc.. A princípio, quanto maior o  $n^{\circ}$  de transistores numa pequena pastilha, maior o espaço a ser ocupado. No entanto, estes transistores podem ter seu tamanho reduzido, ocupando menos espaço na pastilha de material semicondutor. Assim a demanda

por mais espaço e complexidade nas pastilhas semicondutoras provoca o desenvolvimento de dispositivos com dimensões cada vez menores. A redução do tamanho destes componentes está diretamente ligada à resolução do processo fotolitográfico utilizado para definir o "layout" do circuito eletrônico na pastilha semicondutora (1). Por outro lado existe a necessidade de se aumentar a velocidade de comutação dos componentes para que estes tenham maior facilidade de penetração e consolidação no mercado consumidor, ávido por máquinas mais rápidas, que utilizem componentes com tempos de resposta menores que os das gerações anteriores.

Os problemas tecnológicos associados a um paradigma têm uma variedade muito grande. Quanto mais novo for um paradigma, maiores e mais numerosos serão os problemas a serem resolvidos. Conforme o paradigma amadurece, ou seja, o padrão tecnológico vai se tornando conhecido e dominado pela sociedade, menores e menos complexas serão as barreiras apresentadas à sua evolução. A partir daí, calcada numa base socio-econômica já adaptada e desenvolvida, todas as potencialidades do novo padrão tecnológico poderão ser exploradas, levando à maximização da eficiência segundo as práticas vigentes.

-----

nota 1: Os circuitos eletrônicos integrados são pequenas pastilhas de material semicondutor onde são construídos diversos tipos de componentes eletrônicos, geralmente transistores, diodos, etc.

Enquanto o sistema econômico não assume sua plena capacidade produtiva perante o novo paradigma, é preciso manter altas as taxas de inovação tecnológica para fazer frente às demandas por maior eficiência e lucro. É preciso evoluir buscando todas as alternativas que prometam solucionar problemas tecnológicos e garantir a sobrevivência dos agentes econômicos engajados diretamente no processo de inovação tecnológica. Em outras palavras: o que importa é resolver as demandas do mercado de forma satisfatória e assim permitir que as inovações garantam o domínio de mercado por aqueles que nelas investiram. Mas como definir as direções a serem seguidas? Como elas se inserem no modelo de paradigma tecnológico? Feita uma opção por determinada tecnologia, como ela transita em torno do paradigma?

Na realidade, o conceito de paradigma tecnológico é amplo o suficiente para englobar um ramo de atividade (como o de "componentes microeletrônicos") mas um tanto quanto impreciso no sentido de um maior detalhamento da evolução das diversas famílias de elementos existentes neste ramo de atividade (como a de "componentes microeletrônicos CMOS", por exemplo). Estas "famílias" ou sub-divisões são o resultado natural de uma série de requisistos e pressões que levam ao desenvolvimento de produtos diferenciados segundo o seu destino no mercado demandante. O conceito de trajetórias tecnológicas está associado a estas sub-divisões.

As trajetórias tecnológicas são o conjunto de atividades periféricas a um determinado paradigma, procurando a resolução de problemas e visando atingir algumas metas especí-

ficas deste paradigma. Segundo Dosi [2], estas trajetórias "podem ser representadas pela movimentação dos "trade-offs" multidimensionais existentes entre as variáveis que o paradigma define como relevantes". Assim, tomando como exemplo o caso da microeletrônica temos, a nível dos materiais utilizados como base para a fabricação de circuitos integrados, as trajetórias referentes ao silício (a mais bem sucedida), a do germânio (que foi eclipsada pela trajetória do silício), a dos materiais compostos como o Arseneto de Gálio e similares (utilizados em optoeletrônica e superprocessamento), etc..

As trajetórias tecnológicas seguem algumas variáveis relevantes que estabelecem objetivos comuns e que, no caso da microeletrônica, como já foi abordado acima, estão representadas por metas como: diminuição da dimensão mínima dos elementos de um circuito integrado (implicando em modificação de sua densidade funcional), aumento da velocidade de operação, baixo consumo, etc..

## II.2 - Nascimento, Vida e Morte de um Paradigma

Não existe uma metodologia claramente estabelecida para se determinar quando, exatamente, um paradigma supera outro ou deixa de ser o padrão reinante. Da mesma forma, os fatores que levam uma determinada tecnologia ascender ao nível de um padrão tecnológico são múltiplos e muitas vezes imprecisos. Talvez a melhor maneira de se analisar estes fenômenos seja o de levantar os fatores associados a cada paradigma e relacioná-los às diversas demandas existentes na



sociedade. Procuraremos centralizar a análise nos paradigmas do petróleo (no que concerne ao seu apogeu e queda) e da microeletrônica (no que concerne ao seu surgimento, basicamente).

O paradigma atualmente em decadência tinha como insumo principal o petróleo que, antes de 1973, quando ocorreu a primeira crise energética, era abundante e, antes de tudo, barato. As atenções estavam completamente voltadas para o desenvolvimento de tecnologia nos setores de petróleo e petroquímica. Não havia maior preocupação no sentido de se economizar qualquer derivado de petróleo, tanto da parte das empresas como do público em geral. O modelo adotado para a produção industrial era baseado em metodologias Tayloristas e Fordistas, sendo as linhas de montagem dotadas de pouca ou nenhuma flexibilidade. A variação na aparência ou características de cada produto saído de um linha de montagem era nula, ou seja, todos os elementos de um determinado modelo de carro, por exemplo, eram idênticos em todos os detalhes, desde a cor e acabamento interno até a cilindrada do motor. A estrutura das empresas fabris tendia a separar a área de projeto e administração da área de fabricação propriamente dita, sem maiores preocupações sobre a integração das atividades da empresa.

A introdução da eletrônica já havia acontecido durante a época áurea do paradigma que descrevemos no parágrafo acima. Os componentes eletrônicos eram utilizados de forma sub-reptícia no controle de processos industriais, rádios, televisões, armamentos e outros produtos [3]. A sua vocação

como mola mestra do paradigma que vemos agora se desenvolver só foi percebida quando se passou a processar informações através de computadores, e a partir daí o processamento de dados tornou-se cada vez mais dependente da evolução da indústria de componentes e de informática. Atualmente procedimentos comuns na década de 50, quando se desperdiçava energia em grandes quantidades, parecem já não fazer parte do senso comum nas décadas de 1970 em diante. A estrutura das empresas tem sido modificada visando o aproveitamento máximo dos insumos e da energia de forma a maximizar as margens de lucro. O modelo de estruturação da produção que tem se imposto é o da fusão das áreas de administração, projeto e fabricação. A microeletrônica cumpre papel fundamental nesta reestruturação, na medida em que possibilita o fluxo de informações mais ágil e barato. A flexibilização da produção, embutida neste modelo de integração, tornou-se o objetivo a ser alcançado pelas empresas, fugindo à padronização anterior e procurando a satisfação das necessidades individuais dos consumidores. Assim, o carro, que antigamente vinha numa só cor e acabamento e com apenas um tipo de motor, pode ser encomendado com diversas variações destes itens, tendo como objetivo final conquistar o consumidor frente à concorrência. Tais impactos da microeletrônica sobre o sistema produtivo serão abordados em maior detalhe mais adiante.

Pelos parágrafos acima podemos reparar que as manifestações de esgotamento de um paradigma são múltiplas [3]. O momento exato de substituição de um paradigma por outro não pode ser precisado, dada a variedade imensa de fatores pre-

sentes nos universos técnico, econômico e político. Talvez o melhor seja transcrever o trecho de um artigo de C. Perez, onde a autora sustenta que:

"...O verdadeiramente novo ... não é o mero feito técnico. A ruptura (provocada pelo novo paradigma) se produz quando se entrelaçam o técnico e o econômico através de uma dramática redução do custo do insumo ou conjunto de insumos-chave (os principais insumos do paradigma), como consequência de uma série de eventos, alguns fortuitos e outros planejados, incluindo uma constelação de inovações técnicas e organizativas radicais. E estes saltos tecnológicos tem maior probabilidade de ocorrer - ou de serem plenamente reconhecidos, explorados e amplamente aplicados - quando o conjunto de tecnologias baseadas na utilização do fator-chave (o principal insumo) anterior tenha esgotado seu potencial para contribuir para o aumento da produtividade" [3]..

### II.3 - Sistemas Tecnológicos e Inovações Tecnológicas

Todo paradigma, assim como suas trajetórias, fazem parte de um sistema tecnológico com dinâmica própria. O conceito de sistema tecnológico, como abordado por C. Perez, diz respeito a conjuntos de inovações interrelacionadas técnica e economicamente e que afetam os vários elementos do aparato produtivo [3]. Este sistema está constantemente submetido a melhorias em seus processos de fabricação assim como em seus produtos. Estas melhorias são expressas pelo aumento da eficiência tecnológica, definida como sendo o conjunto de melhorias relacionadas à produtividade e precisão

dos processos, à melhora na qualidade dos produtos, etc.. De uma forma geral todos estes melhoramentos se dão graças a uma série de inovações tecnológicas que, em última análise, são a base da evolução tecnológica, ou progresso técnico. Segundo C. Perez [3] "a partir da perspectiva de um sistema tecnológico se estabelece uma lógica própria que acaba por mostrar os principais caminhos para sucessivas inovações radicais interrelacionadas numa trajetória natural global. Uma vez estabelecida a lógica do sistema, é possível prever uma sucessão crescente de novos produtos e processos, cada um dos quais visto individualmente como uma inovação radical, mas que, dentro do conjunto do sistema, podem ser vistas como inovações incrementais."

Neste ponto é importante notar que existem algumas inovações mais radicais que outras, ou seja: alguns melhoramentos são provocados por inovações incrementais e outros por inovações radicais. Inovações incrementais são as melhoras sucessivas a que estão submetidas todos os processos e produtos. Inovações radicais consistem na introdução de um produto ou processo verdadeiramente novo. Os conceitos de paradigma e trajetória estão relacionados principalmente às inovações incrementais já que é através delas que um paradigma amadurece. As melhoras sucessivas na obtenção de menores dimensões nos elementos de um circuito integrado estão associadas ao encadeamento de inovações incrementais na área de processos de produção. A invenção do transistor em 1947 nos laboratórios da Bell foi uma inovação tecnológica radical, e, embora não tenha feito surgir de imediato um novo

setor de atividade, como aconteceu com algumas outras inovações tecnológicas radicais (fissão nuclear, por exemplo), acabou por gerar todo um arcabouço para a chamada "revolução da informática".

Numa abordagem econômica, C. Freeman [4][3], sustenta que as diversas modificações provocadas por inovações incrementais mantém o aumento da produtividade e "determinam a gradual modificação dos coeficientes da matriz insumo-produto sem modificar sua estrutura." A matriz insumo-produto é utilizada em análises econômicas onde seja necessário saber a participação de cada insumo num produto final, ou seja, qual a porcentagem de custos de um produto final que está associada a um insumo específico. Os coeficientes desta matriz se modificam conforme seja utilizado maior ou menor quantidade de um insumo num produto final (consideram custos fixos para o insumo). Em notação matemática seria algo do tipo:

$$\begin{array}{|cccc|cc|} \hline a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} & P_{11} & i_{11} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} & P_{21} & i_{21} \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} & P_{nn} & i_{nn} \\ \hline \end{array}$$

$$A \cdot P = I$$

Onde: A é a matriz de coeficientes insumo-produto,

I é a matriz de insumos e

P é a matriz do produto.

Os coeficientes  $a_{ij}$  ( $i, j \leq n$ ) expressam as parcelas dos insumos da matriz I presentes nos produtos  $P_{ij}$  ( $i, j \leq n$ ).

Vejamos um exemplo: digamos que um laser semiconductor, de custo final hipotético de US\$ 1.000, tenha, durante o processamento para fabricação, utilizado o equivalente a US\$ 20 em Arseneto de Gálio. Arbitramos que o insumo ocupa a posição  $i_{21}$  na matriz dos insumos e que o produto final esteja relacionado ao elemento  $P_{21}$  na matriz dos produtos. Efetuando a multiplicação das matrizes A e I teríamos:

$$\begin{array}{|cccc|cc|} \hline a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} & P_{11} & i_{11} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} & 1000 & 20 \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} & P_{nn} & i_{nn} \\ \hline \end{array}$$

Donde se obtém a expressão:

$$a_{21}.P_{11} + a_{22}.1000 + a_{23}.P_{31} + \dots + a_{2n}.P_{nn} = 20$$

Normalizando a expressão segundo o produto final, para obtermos as parcelas dos insumos presentes em 1 (um) laser semiconductor, temos:

$$(a_{21}.P_{11} + a_{22}.1000 + a_{23}.P_{31} + \dots + a_{2n}.P_{nn})/1000 = 20/1000$$

Considerando-se apenas o produto P<sub>21</sub> e desprezando-se todos os outros produtos finais (P<sub>ij</sub>=0 para i diferente de 2 e j diferente de 1) temos:

$$a_{22}=20/1000=0,02$$

A parcela de Arseneto de Gálio presente no laser semiconductor é de 0,02 ou 2%.

O que Freeman quis dizer é que conforme os processos de fabricação evoluem no sentido da obtenção de maior eficiência, através das inovações tecnológicas e organizacionais, menor será a parcela referente a tal insumo no produto final e, portanto, menor será o coeficiente relacionado a este insumo na matriz insumo-produto. Quanto maior for a eficiência da produção menor quantidade de insumo será utilizada para a fabricação de um produto. Na medida em que as inovações provocadoras da alteração dos coeficientes da matriz insumo-produto não afetem sua estrutura, ou seja, que não haja a criação de novos produtos e/ou insumos (novas li-

nhas e colunas na matriz), pode-se dizer que estas são inovações incrementais. Caso haja a ruptura da estrutura da matriz em algum ponto, seja através da criação de um produto completamente novo, seja através da criação de um novo insumo, pode-se dizer que estas mudanças foram provocadas por uma inovação radical.

#### II.4 - Lógica e Previsibilidade de um Sistema Tecnológico

A lógica embutida em um sistema tecnológico determina sua dinâmica, relacionada à quantidade de inovações e ao ritmo de introdução destas inovações no sistema. Esta dinâmica também é denominada "trajetória natural" ou "paradigma tecnológico". Existe uma certa previsibilidade na lógica de um sistema tecnológico na medida em que vários de seus parâmetros e objetivos são conhecidos.

Partindo-se de uma base que proporcione conhecimentos técnicos suficientes e os princípios econômicos fundamentais é possível estabelecermos algumas diretrizes de inovação em relação a determinados componentes semicondutores, mesmo que estas "previsões" tenham uma boa parcela de generalizações. Por exemplo: ao longo do tempo as memórias deverão ficar mais rápidas e mais densas, ou seja, serão utilizadas com frequências de chaveamento mais altas e terão maior capacidade de armazenamento de informações.

Note-se que estas previsões sempre estão ligadas à obtenção, ao alcance dos objetivos do paradigma a que pertencem, como já foi abordado alguns parágrafos acima. A partir



destas diretrizes podem-se elaborar programas de pesquisa e desenvolvimento, assim como estudos de oportunidades de investimentos, divisando-se as diversas opções tecnológicas a serem exploradas: quais as possibilidades de exploração efetiva dos diversos processos de fabricação disponíveis ou em vias de desenvolvimento e comercialização; quais as tecnologias de projeto mais adequadas para alcançar as diretrizes e metas de integração em silício ou outros materiais semicondutores etc. Todos estes procedimentos de prospecção tecnológica encontram-se engajados de uma forma ou de outra à lógica inerente ao sistema tecnológico em questão.

A eletrônica forma um sistema tecnológico com inúmeras famílias de tecnologias agregadas e partilhando de uma série de inovações de utilização mútua. Por exemplo: dentro do sistema tecnológico associado ao complexo eletrônico temos várias famílias de produtos e componentes que podem ser consideradas inovações radicais se olhadas de forma autônoma mas ao mesmo tempo podem ser consideradas inovações incrementais no âmbito mais abrangente do sistema. Assim, para citarmos um exemplo, a "inovação radical" que foi o computador pessoal, permitindo a utilização mais generalizada de equipamentos de processamento de dados e alterando de forma radical o cotidiano de uma boa parcela da população nos países desenvolvidos e colocando em xeque conceitos de centralização na manipulação de dados existentes anteriormente com a utilização maciça de "main-frames", só pode ser considerada desta maneira quando analisada individualmente. Se analisada dentro da teia de inovações existentes no sistema tec-

nológico do complexo eletrônico a inovação atrelada aos sistemas de microcomputação pessoal é apenas uma evolução gradual no sentido de se colocar alguns componentes de geração mais nova num "invólucro" pequeno e de mais fácil acesso a toda uma faixa de consumidores, sejam pessoas físicas ou jurídicas. Desta forma o microcomputador pessoal, em que pese seu impacto em algumas faixas de consumidores, não é nada mais que uma inovação incremental na família tecnológica dos equipamentos de informática, atrelada a um sistema ainda mais amplo que é o complexo eletrônico.

A partir do exemplo acima podemos abordar outro aspecto relacionado ao conceito de sistemas tecnológicos: a interrelação existente entre as diversas inovações que acontecem em cada família tecnológica associada ao sistema. Sem a evolução da família de tecnologias microeletrônicas, através de inovações relacionadas à redução de tamanho e aumento da velocidade dos circuitos, não seria possível a fabricação de microcomputadores pessoais tais como foram introduzidos em fins da década de 70. Estas inovações também atingiram áreas como a de equipamentos para telecomunicações como transmissores de dados, comutação de pacotes, centrais digitais de telefonia etc., além da família de bens finais para entretenimento como "cd players", o "walkman" e outros produtos como televisões portáteis do tamanho de um livro de bolso, etc. Por outro lado, as inovações relacionadas ao aproveitamento mais extensivo do "hardware" introduzido pela evolução tecnológica dos componentes eletrônicos proporcionou a evolução dos procedimentos de projeto e processamento. A facilitação

destes procedimentos implica, dentre outros fatores, a implementação e teste de toda uma série de novos componentes de forma mais rápida e confiável. Formam-se, então, uma série de ciclos onde as inovações são propagadas entre os diversos setores do complexo eletrônico, numa relação que poderíamos chamar de "simbiótica".

A teia de inovações dentro de um sistema tecnológico torna-se bastante complexa na medida em que este sistema tende a ser multi-disciplinar e/ou tem fortes relações (principalmente em termos de insumos) com outros sistemas tecnológicos. No caso da microeletrônica, por exemplo, inovações e modificações nos processos de obtenção de insumos em outros setores, como os insumos químicos (fotopolímeros, reagentes etc.) e metalúrgicos (silício, materiais compostos como arseneto de gálio, fosfeto de índio, etc) contribuem para modificar os limites existentes nos processos de produção de diversos componentes semicondutores. A utilização de fotopolímeros de maior resolução e/ou sensíveis a radiações como raio-X permite a diminuição das dimensões mínimas dos dispositivos semicondutores de um "chip", contribuindo para o aumento da densidade de integração. Da mesma forma inovações nos laboratórios metalúrgicos de pesquisa possibilitam a descoberta e utilização de novos materiais semicondutores que, utilizados pela indústria de eletrônica, podem dar origem a novos tipos de circuitos integrados, lasers semicondutores, etc., abrindo todo um leque de possibilidades de evolução tecnológica e a geração de novas e inusitadas aplicações.

Os conceitos de inovação aqui apresentados podem levar a alguma confusão, principalmente no que se refere à distinção entre o que é uma inovação, uma invenção e o que é a difusão destas inovações. Schumpeter, citado em C. Perez [3] distingue os três conceitos da seguinte forma: a invenção de um produto ou processo acontece numa esfera científica e pode evoluir ou não para outro estágio de utilização. Em outras palavras: sair do papel para a realidade mais cotidiana. Já a inovação é, explicando de forma bem simples, a invenção que conseguiu passar de uma esfera tecno-científica para uma esfera tecno-econômica, atingindo um universo comercial. Sua evolução se dará segundo os processos inerentes aos conceito de paradigma e trajetória, definindo os mecanismos de difusão. Nesta, a invenção (que nasceu numa esfera tecnico-científica, passando por uma esfera tecnico-econômica) assume proporções dignas de um fenômeno econômico-social, com impactos notáveis sobre os universos social, econômico e político. A difusão da tecnologia microeletrônica tem tido enormes impactos na sociedade, na economia e mesmo na relação entre países e/ou grupos de países, cômicos da importância estratégica do domínio desta tecnologia. No próximo item detalharemos os fenômenos de difusão.

## II.5 - Difusão

A difusão tecnológica, ou seja, a propagação do conhecimento tecnológico, é um fenômeno rico, de várias facetas e sujeito a diversos tipos de análises e conceituações. A análise que aqui faremos está baseada em trabalhos de G. Dosi,

autor que analisa os processos de difusão considerando que a tecnologia não é um bem amplamente disponível e que portanto sua difusão está sujeita a diversos fatores definidos pelos setores ofertante e demandante.

Segundo Dosi [2], a difusão tecnológica está fortemente relacionada aos diversos graus de apropriabilidade, conhecimento tecnológico implícito e cumulatividade do processo tecnológico. Assim:

- os padrões de inovação e/ou imitação por um agente individual e seu grau de sucesso inovativo dependem também da capacidade tecnológica dos próprios agentes, seu campo de especialização, da "heurística" e do "conhecimento implícito" que cada empresa possui;

- a consequência natural é que os agentes econômicos, longe de serem "iguais" (igualmente capacitados) mostram diversos graus de assimetria que contribuem para determinar seu desempenho individual e mesmo coletivo.

Vejamos o que significa tudo isto.

A tecnologia, segundo esta abordagem, não é um bem amplamente disponível, como alguns autores a consideram (S. Davies, citado em DOSI [2]). A sua apropriabilidade, o conhecimento implícito e a cumulatividade do progresso tecnológico são funções inversas da taxa de difusão tecnológica. Compreende-se: quanto menor for a possibilidade de um agente econômico (vamos chamá-lo de agente "A") manter a propriedade de determinada tecnologia, mais fácil será para um outro agente "B" utilizar-se desta mesma tecnologia.

Com relação ao conhecimento tecnológico implícito,

quanto menos explícito for o processo de desenvolvimento tecnológico gerenciado por um agente "A" menores serão as chances de um agente "B" desenvolver e/ou absorver plenamente tal tecnologia.

A abordagem relacionada à cumulatividade poderia ser resumida da seguinte forma: conforme uma determinada opção tecnológica obtem resultados positivos de aceitação no mercado, ou seja, dá certo, tende-se a concentrar investimentos nesta opção tecnológica, incrementando o desenvolvimento de produtos e processos. A acumulação de capital promovida pelo agente "A" em torno de determinada tecnologia tende a dificultar a entrada de um agente "B" no "métier" deste processo. Quanto maior a cumulatividade, maior a barreira à difusão tecnológica.

Apenas como exemplo podemos transcrever alguns dados expostos em Kaplinsky[5] sobre o volume de investimentos necessários em eletrônica. Se considerarmos o volume de investimentos em pesquisa e desenvolvimento em relação ao faturamento descobriremos que os 15 maiores investidores em P&D nos E.U.A. são empresas cuja atividade principal é a de produzir produtos eletrônicos. A média de investimentos em P&D na indústria americana, incluindo todos os setores industriais, foi de 2% do faturamento desde a década de 70. A indústria eletrônica, considerada separadamente, investiu mais de 6% de seu faturamento em atividades de P&D, enquanto que alguns fabricantes de semicondutores investiram a taxas de até 20%. Apenas a IBM investiu cerca de US\$ 2 bilhões em pesquisa em 1982, o equivalente a verba destinada para todo

o programa do computador de 5ª geração japonês, com duração de 10 anos. Os investimentos necessários para a manutenção da modernidade tecnológica aumentam a cada ano: o investimento mínimo para a produção de semicondutores de última geração era de US\$ 100.000 em 1954, de US\$ 300.000 em 1958, de US\$ 500.000 em 1967, de US\$ 2 milhões em 1972, de US\$ 5 milhões em 1976, de US\$ 10 milhões em 1978 e de US\$ 60 milhões em 1982 (dados da OECD, citados em Kaplinsky[5]). A empresa coreana Samsung investiu cerca de US\$ 500 milhões nos anos de 1984 e 85 para começar a produzir memórias de 64k e 256k.

Com relação ao grau de assimetria entre os diversos agentes envolvidos podemos dizer que quanto maior a assimetria menor a taxa de difusão. Explicando: a assimetria está diretamente relacionada às barreiras de entrada existentes num determinado setor de atividade. A diferença de capacidades tecnológicas entre as empresas já estabelecidas num mercado e outras que procuram entrar neste mercado é um fator de bloqueio para estas últimas, dificultando a efetiva transferência de tecnologia e a partir daí limitando os processos de difusão tecnológica. Dosi acrescenta que uma das consequências destas assimetrias é a de que "os níveis de margens de lucro (tanto para as empresas líderes como para a indústria de um determinado setor) e a variância nas margens de lucro são uma função direta do grau de assimetria da indústria."

A afirmativa acima pode ser explicada pelo fato de que, quanto maior a assimetria, mais intenso é o efeito de cumulatividade explicado anteriormente. Os requisitos de ca-

pital necessários para se desenvolver uma nova aplicação/produto são mais pesados para aqueles agentes que não dominam a tecnologia e que, portanto, estão sujeitos a margens de lucro pequenas ou mesmo negativas. No entanto, os líderes do setor, desde que mantenham um bom volume de capital investido em pesquisa e desenvolvimento, podem mais confortavelmente caminhar pela curva de aprendizado clássica, mostrada na figura II.1.



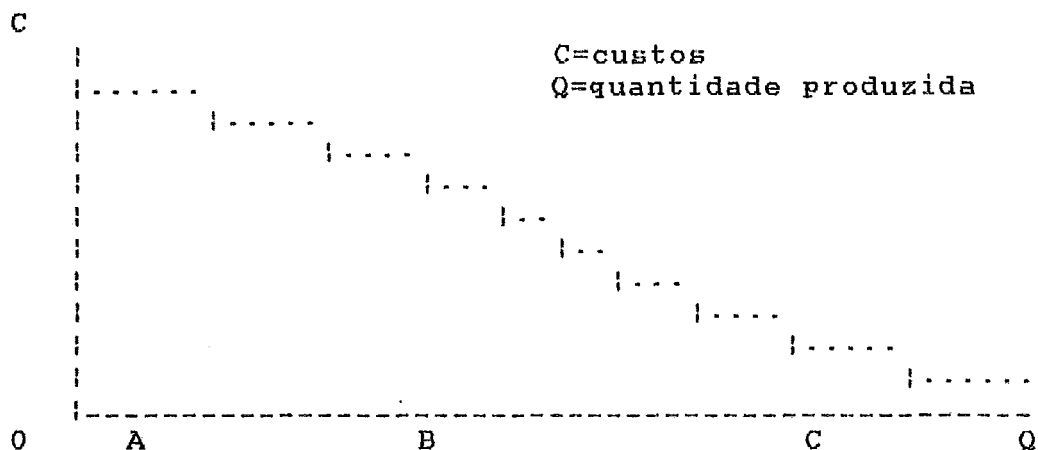


FIGURA II.1: Curva de aprendizado clássica.

No ponto "A" da figura II.2 abaixo o preço de um produto é inicialmente alto para amortecer os custos em P&D, projeto e processos de fabricação. Além disto, a empresa pioneira em determinado produto/tecnologia pode praticar preços mais altos pelo monopólio de que dispõe inicialmente. Após esta primeira fase, a empresa inovadora tende a reduzir seus preços para aumentar sua participação no mercado e dificultar a entrada de concorrentes através da diminuição das expectativas de lucro. O aumento da produção, por outro lado, leva à aceleração do processo de aprendizado tecnológico, gerando processos de produção menos custosos que permitem a redução de preços sem reduzir as margens de lucro. A coisa evolui num "moto-contínuo" até que a entrada de outra geração de produtos provoque a queda de preços da geração anterior, no ponto "B". Nesta nova geração (que no gráfico abaixo aparece representada pela curva "b") a sequência de redução de custos vs. experiência se dará de forma similar à

da geração anterior (curva "a").

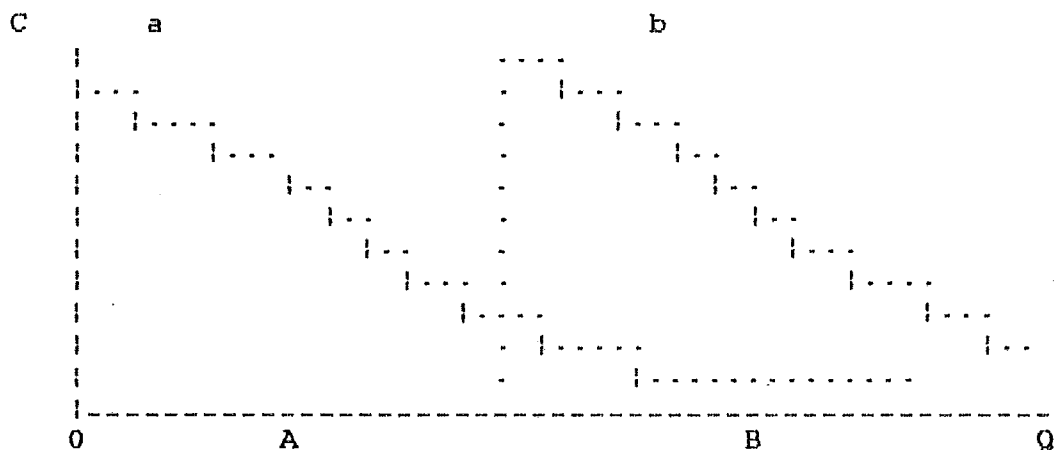


FIGURA II.2: Curvas de aprendizado de produtos de diferentes gerações.

Na indústria de semicondutores, especialmente microeletrônica, esta sequência se dá de forma muito rápida, razão pela qual as empresas têm que ter bastante agilidade ao gerenciar seus programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D), produção e planejamento estratégico, sob o risco de abandono temporário ou definitivo do mercado. Um atraso da ordem de 6 meses no lançamento de um produto pode ser fatal para os retardatários.

A principal consequência deste "sequenciamento tecnológico", no caso específico da microeletrônica, é a busca de maior densidade de informação (maior capacidade de armazenamento e processamento) a custos cada vez menores. Todo este processo está embutido na evolução das trajetórias do para-

digma, consequência da perseguição de suas metas (menores dimensões dos elementos de um circuito e maior velocidade, principalmente) e de sua difusão.

## II.6 - A Difusão e seu Insumo-Chave

A difusão tecnológica exige um "veículo" de propagação, acessível a milhões de agentes individuais de decisão, ou seja, ao grande mercado consumidor [3]. No caso do paradigma prevalecente em meados do século, conforme explicado no item II.2, os "veículos" de propagação eram, principalmente, o petróleo e seus derivados, além da energia elétrica e de materiais metálicos baratos e abundantes. Isto proporcionou a formação de uma estrutura de produção baseada no consumo de massa característico do pós-guerra, com a fabricação pouco flexível de equipamentos e bens finais, sem a preocupação de economia no consumo de energia. O "modus vivendi" da época não levava em conta a economia de combustíveis fósseis (basicamente petróleo) e era absolutamente normal a fabricação de carros que não levavam em conta a redução do consumo de combustível através de melhoramentos mecânicos e aerodinâmicos, ao contrário do que ocorre atualmente. O desperdício generalizado de matérias primas e combustíveis era a atitude normal e estimulada na época [3]. Exemplo que podemos imaginar é o da dona de casa americana que, mesmo tendo um pequeno supermercado na esquina perto de casa, preferia sair com sua enorme "station wagon" com motor de 3.000 centímetros cúbicos, 8 cilindros, gastando 1 litro de gasolina a cada 3 quilômetros, para ir a outro supermer-

cado mais distante onde algumas mercadorias estavam mais baratas em alguns poucos centavos. Evidentemente antes da crise do petróleo de 1973.

O paradigma que divisamos atualmente tem como "veículo" de propagação o circuito integrado e dispositivos semicondutores em geral, pois através destes componentes pode-se manipular informações de qualquer origem de forma rápida e barata. Estes insumos cumprem um papel fundamental na estruturação do paradigma a que pertencem. Para isto:

- seu custo frente à opção de utilização de outro insumo deve ser bastante baixo e com tendência decrescente claramente previsível;

- sua oferta deve parecer ilimitada, mesmo frente a uma demanda crescente;

- deve ser de utilização potencialmente universal;

- este insumo deve encontrar-se na raiz de um sistema de inovações técnicas e organizativas claramente reconhecidas como capazes de mudar as características e reduzir os custos do equipamento, da mão-de-obra e dos produtos finais [3].

Está claro que atualmente os insumos que preenchem todos estes requisitos são os componentes semicondutores microeletrônicos.

O custo funcional dos "chips" diminui a cada nova geração. Cada vez mais funções são colocadas numa única pastilha de silício, fazendo com que a aquisição de um circuito integrado ainda novo no mercado possa ser efetivamente mais compensadora que a de um circuito mais antigo e barato. Au-

menta-se a capacidade de manipulação de informações e diminui-se custo agregado a esta manipulação. Para exemplificarmos o exposto acima vamos rememorar a evolução das memórias de computador. Antigamente, nas décadas de 50-60 (e me perdoem os que viveram nestas décadas, mas em termos de eletrônica computacional o que se fazia na época já faz parte de museus), as memórias eram feitas com núcleos de ferrite, grandes e custosos, e os maiores computadores não tinham capacidade de memória superior à de um micro de oito bits do tipo TRS-80 ou de um MSX, lançados na década de 70-80, utilizando memórias semicondutoras em silício. A diferença é que, além de menores, estes microcomputadores são comercializados a preços milhares de vezes mais baixos que seus equivalentes mastodônticos cerca de dez anos mais velhos. Como exemplo temos um gráfico, na figura II.3 que ilustra a redução de custo por bit de memória RAM dinâmica de 1971 a 1981.

Custo (0.01 US\$)

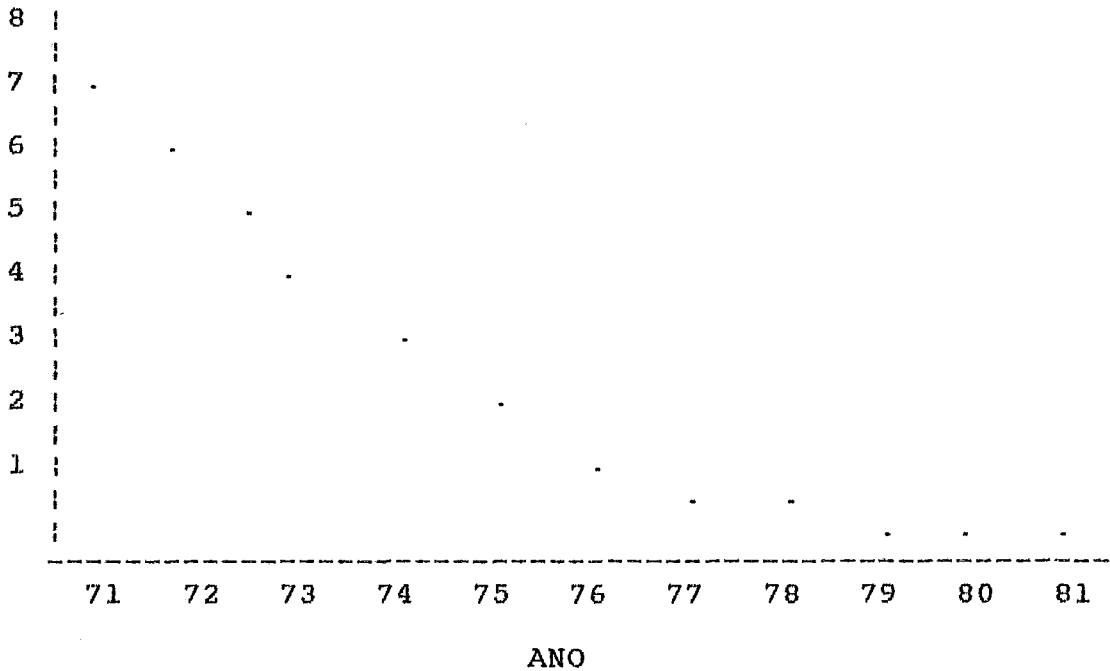


FIGURA II.3: A redução dos custos do bit de memória em centavos de dólar por bit. FONTE: [5].

Dado o alto grau de difusão da tecnologia microeletrônica, os circuitos integrados são facilmente obtíveis a custos cada vez menores. Sua oferta, portanto, parece praticamente ilimitada frente à demanda por maior desempenho e maior variedade de aplicações. Nenhum engenheiro eletrônico, atualmente, pensa em fazer qualquer projeto sem a utilização de pelo menos um circuito integrado, ou, de forma mais abrangente, sem a utilização de um dispositivo semiconductor qualquer. Da mesma forma é muito difícil que um gerente numa empresa de grande, pequeno ou médio porte não cogite em utilizar equipamentos de base microeletrônica. A utilização da microeletrônica já está na "lógica" produtiva de todas as

pessoas que precisem ou tenham a obrigação de produzir qualquer bem industrializado, desde um computador até um pedaço de tecido.

A penetração destes componentes em todo tipo de atividade industrial, seja de projeto ou de processamento, nas atividades do setor terciário e mesmo nas do setor primário, nas residências, universidades etc., expõe de maneira inequívoca a diversidade e universalidade da tecnologia microeletrônica e demonstra a extensão do seu processo de difusão.

## II.7 - Impactos do Processo de Difusão da Microeletrônica

A difusão das tecnologias microeletrônicas vem provocando uma série de fortes impactos na estrutura produtiva e nas relações sócio-institucionais. Longe de querer esgotar o assunto, pretendemos lançar alguns tópicos de discussão relacionados à forma como vem se dando este processo.

### II.7.1 - Contexto Econômico

De forma geral, as transformações estruturais derivadas das introdução e difusão de um novo paradigma tecno-econômico não se dão, certamente, de forma linear e tranquila. O processo de crise frente às modificações provocadas por uma mudança brusca nas relações tecno-econômicas já foi chamado por Schumpeter de "Destruição Criadora", na medida em que ocorre o sucateamento das estruturas de produção e consumo para dar lugar a uma "nova ordem" produtiva [3]. A absorção dos efeitos de uma revolução tecnológica, segundo

Schumpeter, dá origem a uma época de "grandes auges econômicos" típicos da teoria das ondas de Kondratieff [3]. Outra abordagem bastante interessante é a efetuada por Kaplinsky [5], na qual se sugere que a economia mundial tem estado em declínio desde o início da década de 70, coincidentemente com o advento da eletrônica nos processos e produtos. A tabela abaixo expõe alguns números referentes ao desempenho da economia mundial desde o século passado.

---

Crescimento médio dos PIB's (%)

---

PERÍODO	
1820-70	2,2
1870-1913	2,5
1913-50	1,9
1950-73	4,9
1973-79	2,5

---

TABELA II.1: Desempenho da economia mundial. FONTE:

Maddison, A. 1982, Phases of Capitalist Development, Oxford, Oxford University Press, citado em Kaplinsky [5]



-----  
Crescimento médio dos PIB's (%)  
-----

PERÍODO	
1900-13	2,1
1913-29	1,9
1929-52/54	2,2
1952-60	4,8
1960-70	5,1

-----

TABELA II.2: Taxas de Crescimento Médio dos Países Me- nos Desenvolvidos. FONTE: Bairoch, P. 1975, The Economic Development of the Third World since 1900. London, Methuen and Co., citado em Kaplinsky [5].

PAÍS	1870-1913	1913-50	1950-60	1960-70	1970-80	1973-80
FRANÇA	1,8	1,7	4,3	5,1	3,8	3,7
ALEMANHA OCIDENTAL	1,9	1,2	6,6	5,2	3,6	3,2
ITÁLIA	1,2	1,8	4,3	6,3	2,5	1,7
JAPÃO	1,8	1,4	5,7	9,6	4,3	2,6
REINO UNIDO	1,1	1,5	2,3	3,2	2,4	1,6
ESTADOS UNIDOS	2,1	2,5	2,4	2,4	1,5	0,8

-----

TABELA II.3: Taxas de crescimento da produtividade em econo- mias da OECD. FONTE: Freeman, Clark e Soete, 1982, Unemployment and Technical Inovation: A Study of Long Waves and Economic Development. London, Frances Pinter, citado em Kaplinsky [5].

Como se constata nas tabelas II.1 e II.2, as taxas de crescimento no período do pós-guerra até princípios da década de 70 foram significativamente maiores que em qualquer outro período analisado. Os dados da tabela II.1 mostram a queda das taxas de crescimento na década de 70. Segundo Ka-

plinsky, alguns estudiosos indicam a crise do petróleo em 1973 como fator determinante para esta queda nas taxas de crescimento, enquanto outros argumentam que este declínio tem suas origens na queda das taxas de produtividade (entendida como a relação produto/recurso) nos países desenvolvidos em meados da década de 60, como mostra a tabela II.3. A mudança das tendências econômicas nas décadas de 1960 e 70 torna-se ainda mais clara quando se analisa a evolução das taxas de desemprego encontradas nos países desenvolvidos, como mostra a tabela II.4.

PAÍS	1933	1959-67	1973	1977	1979	1981	1984
BÉLGICA	10,6	2,4	2,9	7,8	8,7	12,9	13,3
DINAMARCA	14,5	1,4	0,7	5,8	5,3	9,5	10,1
FRANÇA	N.D.	0,7	1,8	4,8	6,0	8,9	9,3
ALEMANHA							
OCIDENTAL	14,8	1,2	1,0	4,0	3,4	6,7	8,3
IRLANDA	N.D.	4,6	5,6	9,2	7,5	11,5	16,0
ITÁLIA	5,9	6,2	4,9	6,4	7,5	9,6	10,4
JAPÃO	N.D.	1,4	1,2	2,0	2,0	2,0	2,7
HOLANDA	9,7	0,9	2,3	4,1	4,1	10,2	15,6
REINO							
UNIDO	13,9	1,8	2,5	5,7	5,8	11,3	11,7
ESTADOS							
UNIDOS	20,5	5,3	4,9	7,0	5,8	8,9	7,5

TABELA II.4: Taxas de desemprego nas economias da OECD. FONTE: Freeman, Clark e Soete, 1982, Unemployment and Technical Innovation: A Study of Long Waves and Economic Development. London, Frances Pinter e Freeman e Soete, 1985, Information Technology and Employment: An Assesment. Brighton, Science Policy Research Unit, University of Sussex, citados em Kaplinsky[5].

O declínio descrito pela análise dos dados das tabelas acima coincide com a difusão generalizada da microeletrônica

ocorrida principalmente a partir de meados da década de 60. Longe de constituir uma coincidência, a difusão desta tecnologia, está fortemente ligada às alterações macroeconômicas observadas no período, assunto amplamente discutido na literatura. O que se discute, principalmente, é se o advento da microeletrônica veio como consequência destas alterações ou se todas estas mudanças se deram graças à difusão da tecnologia microeletrônica. A discussão sobre o assunto é vasta e, justamente por isso, não podemos nos estender em demasia. O tema é admiravelmente desenvolvido em trabalhos de Kaplinsky [5], Rada [6] e Perez [3].

#### II.7.2 - Organização e Informatização da Produção

A introdução de equipamentos de base microeletrônica, ou seja, equipamentos que têm componentes microeletrônicos como um de seus principais constituintes, em diversos setores de atividade - automação industrial, telecomunicações etc. - tem modificado de forma decisiva a forma com que as empresas procuram maximizar suas margens de lucro, através do aumento geral da produtividade. A maior parte da documentação existente sobre impactos da microeletrônica no sistema produtivo está sem dúvida relacionada à introdução de máquinas e/ou equipamentos de automação industrial ou de escritórios, levantando os efeitos da utilização destes equipamentos sobre a organização do trabalho, o desemprego, produtividade, etc. O assunto é incrivelmente vasto, sendo que muito raramente se encontra um estudo onde se ressalte a multiplicidade de escolas de análise, suas metodologias e

conclusões. Raphael Kaplinsky [5] procura apresentar criticamente as análises efetuadas até 1985, aproximadamente, pondo em ordem a verdadeira selva de estudos existentes sobre as relações entre microeletrônica e emprego nas economias da OECD e do terceiro mundo. Entretanto, como o nosso objetivo não inclui uma discussão tão abrangente, devemos nos ater a algumas características básicas da modificação da organização das empresas.

Análise particularmente interessante está exposta em Perez[3], onde, citando Freeman, a autora sustenta que as modificações impostas pelo novo paradigma não são, de forma alguma, de caráter apenas tecnológico: existe toda uma gama de mudanças estruturais que contribuem para aumentar a complexidade do novo modelo econômico a ser implementado e a definir a amplitude das modificações necessárias. Seriam não só modificações em insumos, produtos e processos mas também nas esferas organizativas e gerenciais. Dentre estas mudanças estariam:

- novos conceitos de eficiência para a organização da produção, sendo esta um conjunto a ser integrado;
- um novo modelo de eficiência e organização das empresas;
- menor quantidade de trabalho por unidade de produto;
- novos padrões de investimento, direcionados para setores relacionados ao paradigma nascente;
- aumento da produção de equipamentos e bens finais que utilizem o insumo básico do paradigma;
- mudança na localização geográfica dos investimentos

devido à transformação das vantagens comparativas;

- etc.

É facilmente compreensível que modificações desta natureza, ocorrendo simultaneamente, levem à quase completa desestruturação das relações existentes entre os diversos agentes econômicos.

A introdução de novos conceitos de eficiência e organização pode ser exemplificada pela crescente utilização de metodologias que visem a integração da produção como o Kanban, o Just-in-time, MRP, etc. Para maiores informações recomendamos textos de Bessant [7] e Kaplinsky[5]. Estas metodologias quase sempre têm como característica fundamental a possibilidade utilização de equipamentos de base microeletrônica, que atuam como processadores das informações referentes ao ciclo produtivo, desde o projeto até a fabricação a nível de planta.

Um dos modelos propostos para explicar os diversos níveis de atividade existentes numa empresa fabril leva em conta as três "esferas de produção", conforme definidas por Bessant [7] e Kaplinsky[5]: a esfera de projeto (incluindo as atividades de P&D), a de manufatura (o que seria a planta, o "chão" da fábrica) e a de coordenação (o escritório, incluindo os setores administrativos dentre outros). Dentro de cada uma destas esferas existem diversas atividades passíveis de informatização e/ou automação através da introdução de computadores, máquinas-ferramenta de controle numérico, etc., como a fresagem de uma peça de alumínio no "chão" da fábrica ou a atividade de escrever memorandos e cartas no

escritório do diretor financeiro, por exemplo. Estas atividades podem ser integradas entre si de forma a fazer parte de um sistema automatizado mais amplo e abrangente. Assim, a automatização vai se dando em diversos níveis: primeiro, nas atividades presentes em cada esfera de produção (por exemplo, na utilização isolada de um torno controlado numericamente), depois na integração entre as atividades presentes dentro de uma mesma esfera de produção (entre os diversos setores no chão da fábrica, por exemplo) e, mais adiante, entre as atividades presentes em esferas separadas, caracterizando uma integração inter-esferas. Neste nível de integração as atividades de administração, manufatura, e projeto estariam integradas, passando a configurar um sistema o mais coeso possível no que diz respeito ao fluxo de informações e materiais dentro da empresa. Fazendo uma extrapolação, chegaríamos ao nível em que a integração se daria entre empresas, facilitando o fluxo de dados e produtos entre a fábrica e seus fornecedores, entre as lojas e a fábrica e assim por diante. A forma mais barata e confiável de integração destas diversas atividades dentro das esferas e entre elas (integração intra- e inter-esferas) é a utilização de um aparato computacional que possibilite o fluxo de informações através de toda a estrutura produtiva.

É importante notar que a implementação deste tipo de sistema integrado tem limitantes não só tecnológicos mas também organizacionais. Às vezes pode ser impossível automatizar ou integrar determinada atividade produtiva por falta de tecnologia disponível ou então por falta de conhecimentos

de como implementar organizacionalmente sua integração com outras atividades. A organização da atividade produtiva no sentido de implementar um sistema integrado de manufatura é tão ou mais importante que a instalação de equipamentos informatizados na empresa. A interdependência entre estas duas variáveis (a organização da produção levando em conta a integração através de equipamentos de base microeletrônica, assim como o desenvolvimento de tecnologias visando sua instalação numa "rede" organizacional de estrutura flexível e integrada) tem sido abordada em diversos textos, entre os quais se destacam os de Bessant [7], Kaplinsky[5] e Diana[8].

A técnica de integração da produção por sistemas informatizados descrita acima é chamada de CIM ("Computer Integrated Manufacturing" ou Manufatura Integrada por Computador).

As técnicas de informatização das atividades produtivas podem ter inúmeras denominações, dependendo da atividade em si, da pessoa que a implantou na empresa ou do pesquisador que procura descrevê-la. Duas abreviaturas, além de "CIM", são consideradas como padrão: CAD ("Computer Aided Design" ou Projeto Assistido por Computador) e CAM ("Computer Aided Manufacturing" ou Manufatura Auxiliada por Computador). Elas representam, respectivamente, a automatização ou informatização das atividades de projeto e fabricação.

A organização da produção levando em conta a flexibilidade do sistema e sua integração é, geralmente, implementada através das chamadas "novas metodologias organizacio-

nais." A mais famosa é sem dúvida o "Just in Time - JIT". Para uma leitura mais ilustrativa destes tópicos recomendamos os textos de Bessant[7], Kaplinsky[5] e Dina[8] e Carlotta Perez[3] e Schonberger [9], dentre outros.

## II.8 - Convergência Tecnológica

Tem sido notada uma tendência importante no desenvolvimento de todos os setores pertencentes ao complexo eletrônico e que afeta também outros setores da atividade econômica: a convergência tecnológica. Esta tendência caracteriza-se pelo "relaxamento", ou falta de definição, nas divisões entre os diversos setores existentes dentro do complexo eletrônico, na medida em que se direcionam as aplicações dos equipamentos e componentes eletrônicos para um ponto de integração entre o processamento e a transmissão de informações.

O eixo diretor deste movimento de convergência tecnológica está na natureza do sistema de lógica binária, utilizado em computadores, transmissão de dados, telefonia, etc. [5]. A presença quase que generalizada deste sistema de codificação de informações abre todo um campo de desenvolvimento de produtos e equipamentos na medida em que o sistema lógico binário, base da tecnologia digital, constitui um padrão de fato para a codificação de informações de toda a espécie, seja a de um sinal de voz, previamente digitalizado, até o processamento de imagens numa estação de televisão. Torna-se natural que os desenvolvimentos de novos produtos tenham, de alguma forma, o objetivo de integrar estas fontes de infor-



mação, já que o sistema utilizado para codificá-las é, grosso modo, comum a todas elas.

As empresas atualmente procuram soluções que conciliem o processamento de informações e sua transmissão. Evidentemente existe todo um espectro de aplicações que podem ser integradas num futuro próximo, assim como existem as que já estão integradas. Exemplo: a transmissão de dados originários de processamento computacional através de "modems" e linhas de comunicação de dados específicas para esta finalidade. A situação atual indica que não é suficiente possuir um grande centro de processamento de dados se este se encontra isolado do ambiente circundante, sem nenhuma forma de troca de informações com outros centros de processamento ou outros computadores. Para isto é fundamental a instalação de uma rede eficiente de telecomunicações, incluindo comunicação de dados, centrais digitais de telefonia, etc.. O objetivo, portanto, é a consolidação de uma grande rede de processamento e transferência de informações, ao exemplo do que se convencionou chamar de "sociedade da informação", "informópolis" ou qualquer outro termo parecido.

A nível de produtos as tendências seriam:

-desenvolvimento de equipamentos e componentes preparados para serem conectados a um sistema integrado de informática e telecomunicações;

-maior integração entre equipamentos de audio-vídeo, computadores e telecomunicações através de protocolos padronizados;

-melhoria e desenvolvimento da interface dos componen-

tes microeletrônicos com um sistema de comunicações padronizado;

Ficará claro ao longo desta dissertação qual o papel da optoeletrônica no desenvolvimento desta tendência rumo à convergência.

### CAPÍTULO III - TECNOLOGIA DE DISPOSITIVOS

Neste capítulo explora-se o lado puramente técnico da tecnologia optoeletrônica. Para isto inicialmente apresenta-se o universo no qual os componentes optoeletrônicos estão inseridos: o complexo eletrônico. Na realidade esta é uma abordagem necessária para estabelecer sobre qual universo nossa pesquisa será desenvolvida, já que a optoeletrônica, assim como a fotônica, conforme exposto em nosso capítulo introdutório, estão ambas fortemente relacionadas aos diversos segmentos e/ou trajetórias pertencentes ao complexo eletrônico. Os elementos puramente fotônicos exercem, como veremos mais adiante, a função de transmissores e processadores de luz produzida por componentes optoeletrônicos como lasers semicondutores.

#### III.1 - Componentes Eletrônicos

O universo de componentes eletrônicos, inserido no que se convencionou chamar de "complexo eletrônico" (a reunião de todas as tecnologias e equipamentos relacionados à transmissão ou processamento de sinais eletrônicos), é vasto e extremamente variado. Existem três grandes sub-grupos: o dos componentes eletrônicos ativos, o dos passivos e dos híbridos (figura III.1).

Componentes ativos são aqueles em que a corrente elétrica sofre algum tipo de amplificação (aumento da voltagem e/ou corrente entre entrada e saída). Nos componentes passi-

vos o sinal eletrônico sofre alterações sem, no entanto ser amplificado, apenas atenuado de uma ou outra forma. Os componentes híbridos são aqueles em que existem componentes ativos conectados a componentes passivos num conjunto de pequenas dimensões (menos de 5 cm, geralmente), comercializado como um todo indivisível funcional e fisicamente.

Aumentando o nível de detalhe divísamos os componentes relacionados aos três sub-grupos descritos no parágrafo anterior. Componentes como capacitores, resistores e indutores são componentes passivos.

O componentes híbridos conjugam componentes passivos como capacitores e resistores a componentes ativos como transistores e circuitos integrados, conectados através de trilhas de metal depositadas sobre uma base de material isolante, geralmente alumina. Embora esta seja a definição usual para circuitos integrados híbridos nada impede que se fabrique este tipo de circuito com apenas um tipo de componente. Um exemplo são as redes resistivas fabricadas através de tecnologias de filme-espesso, por exemplo.

O mais variado sub-grupo é o dos componentes ativos. Seus mais antigos representantes são as válvulas termoiônicas que, apesar de terem concepção antiga, ainda cumprem um papel fundamental em várias aplicações onde sinais de alta frequência precisem ser amplificados a altos níveis de potência. Os tubos de raios catódicos são "primos" das válvulas e existem em diversos tipos. O tubo de televisão é um tubo de raios catódicos assim como os monitores dos terminais de computador, osciloscópios, etc. Veremos, ao longo desta dis-

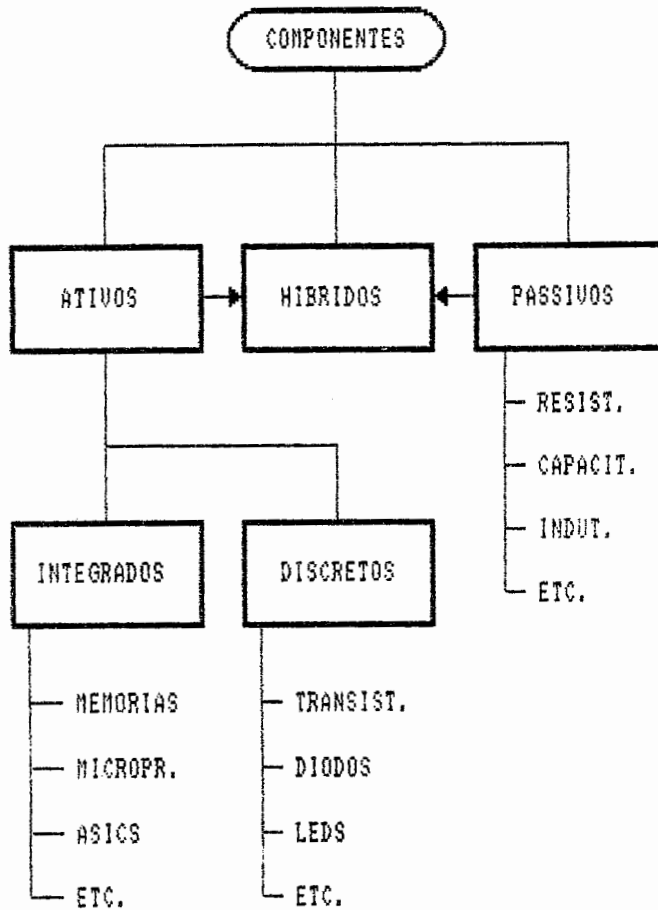


Figura III.1 - Universo Básico de Componentes Eletrônicos.

sertação, que estas peças, geralmente grandes demais para os equipamentos eletrônicos modernos, tendem a ser substituídos por componentes eletrônicos menores, mais leves e econômicos.

Os componentes ativos semicondutores constituem a família mais comentada e analisada do universo de componentes eletrônicos. Sua utilização possibilitou a substituição das válvulas termoiônicas, grandes consumidoras de espaço e energia, por componentes mais econômicos e compactos, cujo primeiro rebento foi o transistor de germânio.

Como este é o sub-setor que mais nos interessa, dedicaremos alguns itens para o detalhamento de suas características e história.

A utilização de materiais semicondutores em larga escala começou após o surgimento do transistor bipolar de junção, normalmente chamado apenas transistor.

Existem vários tipos de transistor, mas os mais famosos e utilizados são o transistor bipolar e o FET ("Field Effect Transistor" ou transistor de efeito de campo). A proposta teórica do FET já havia sido feita na década de 20: em 1927, J.E. Lillinfeld entrou com pedido de patente de um transistor de efeito de campo e, em 1938, O. Heil propôs um FET de junção [10]. Nenhum deles foi construído fisicamente à época, pois existiam dificuldades relacionadas ao crescimento de camadas de material isolante no grau de pureza necessário [11].

Na realidade foi durante uma série de experimentos que utilizavam o efeito de campo, base do FET, em 1947, que W.

Brattain e John Bardeen, além de W. Shockley, pesquisadores do Bell Laboratories, da AT&T, descobriram uma nova forma de amplificar sinais eletrônicos através do contato entre dois pedaços de germânio dopados de forma diferente (\*)[12][13][].

O surgimento de elementos semicondutores utilizáveis industrialmente mudou de forma radical a eletrônica. Em 1946, o primeiro computador eletrônico, o ENIAC, construído nos EUA, tinha como elementos ativos 18.850 válvulas. A máquina ocupava um espaço de cerca de 150 metros quadrados, e consumia uma potência de 150 KW! O número de falhas era muito alto devido à quantidade de válvulas em funcionamento e à baixa confiabilidade destes componentes. Assim grande parte dos programas postos a rodar na máquina não chegavam ao final, pois era grande a probabilidade de queima de uma ou mais válvulas durante a sua execução. Pois bem, o número de válvulas presentes no ENIAC é igual, grosso modo, ao número de transistores de um computador de bolso típico de meados da década de 80 [14]. Basta comparar tamanho, peso, potência consumida e a confiabilidade de ambas as máquinas para avaliarmos o quanto mudou a eletrônica neste período de 40 anos.

---

\* Quando se fala que um material está dopado não se quer dizer que ele foi submetido a LSD, cocaína, valium com uísque ou qualquer outra coisa do tipo. Um material dopado é aquele que foi exposto a determinadas impurezas que alteram suas características eletrônicas.

Na década de 50 a tecnologia de semicondutores, orientada em torno do desenvolvimento do transistor, evoluiu a passos largos. O material semiconductor originalmente utilizado nos primeiros transistores, o germânio, foi substituído gradualmente pelo silício. As vantagens do silício sobre o germânio se faziam sentir principalmente na sua mais baixa temperatura de operação e na sua propriedade de formar óxidos estáveis quando exposto a agentes oxidantes apropriados a altas temperaturas. O óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) proporciona algumas maneiras de controlar diversos processos químicos e eletrônicos pois pode atuar como uma "máscara" isolante contra reagentes químicos e é dielétrico, ou seja, não conduz eletricidade, podendo ser utilizado como isolante elétrico entre algumas partes de um componente semiconductor. Colocando-se ou não uma camada de  $\text{SiO}_2$  sobre determinada área pode-se selecionar quais as partes de uma superfície coberta parcialmente pelo óxido devem ser expostas ou não a impurezas. No item sobre processamento detalharemos um pouco mais estes procedimentos. Por hora, podemos apenas dizer que estas propriedades do silício e de seu óxido, além da elaboração e do desenvolvimento de processos fotolitográficos, levaram à invenção do transistor de tecnologia planar em 1958, na Fairchild. Graças à tecnologia planar tornou-se possível colocar estruturas bidimensionais numa pastilha de material semiconductor como germânio ou silício. Assim, diversos transistores puderam ser colocados num mesmo plano em um disco muito liso de material semiconductor e interconectados por trilhas de metal depositadas sobre sua superfície. A partir



desta técnica foram desenvolvidos os circuitos integrados, também chamados de CI's, IC's ou "chips."

Os lasers têm uma evolução similar à da válvula e do transistor. Inicialmente só existiam lasers à gás, o que implicava a utilização de grandes válvulas ou tubos de vidro preenchidos com gases para a implementação da região ativa do componente, ou seja, a região onde se produz a luz. Até hoje se utilizam lasers a gás em várias aplicações onde é necessária alta potência. Já os lasers semicondutores não tem grande potência luminosa de saída e ainda são limitados em relação à faixa de comprimentos de onda de luz que podem emitir mas, em compensação, são pequenos, geralmente mais baratos e muito mais práticos para aplicações em diversos tipos de equipamentos, desde estações de telefonia até equipamentos domésticos de áudio e vídeo. A tendência, como veremos, é a de uma invasão por parte dos lasers semicondutores das aplicações que atualmente utilizam outros tipos de lasers mais caros e volumosos.

### III.2 - Optoeletrônica e Fotônica

Optoeletrônica é a área de pesquisa, desenvolvimento e fabricação de produtos que envolvem tecnologias de conversão entre sinais eletrônicos e ópticos, ou seja, uma ponte entre o universo de processamento e transmissão de elétrons e o universo de processamento e transmissão de fótons. De forma similar, a fotônica seria a área de pesquisa, desenvolvimento e fabricação de produtos que se destinem ao processamento e transmissão de fótons, ou seja, sinais luminosos.

A descrição destas duas áreas constitui o núcleo deste capítulo e por isso apresentaremos, nos próximos itens, uma descrição das tecnologias envolvidas. Visamos, basicamente, dar uma apresentação a mais completa possível sem, no entanto, cairmos em detalhismos teóricos que acabariam por atrapalhar a compreensão do objeto de estudo. A apresentação de conceitos teóricos será feita sempre que inevitável e de forma ilustrativa

### III.3 - Dispositivos Optoeletrônicos e Fotônicos

Existe uma série de dispositivos que, de alguma forma, geram, processam, conduzem ou convertem luz em sinais elétricos. Os geradores de luz, também chamados de fontes de luz, são basicamente lasers e LEDs. É claro que existem outros tipos de fontes de luz que não serão analisadas porque não tem aplicação possível em componentes de pequenas dimensões como circuitos integrados optoeletrônicos e similares. O processamento da luz pode ser feito através de uma série de dispositivos que se baseiam em fenômenos eletro-ópticos, ou seja, fenômenos em que o comportamento da luz é influenciado pelo da eletricidade e vice-versa. Existem outros tipos de fenômenos similares como o magneto-óptico e o acústico-óptico, que têm também os seus nichos de aplicação. A condução de sinais luminosos pode ser feita através de qualquer meio translúcido. Evidentemente existem alguns meios mais translúcidos que outros, mas pode-se dizer que a forma genérica de se conduzir luz é através dos chamados guias de ondas luminosas. Existem vários tipos de guias de onda mas o

mais famoso é sem dúvida a fibra óptica. A conversão de luz em sinais elétricos é feita através de dispositivos chamados fotodetectores, que produzem uma corrente elétrica sempre que a sua superfície é atingida por fótons. Nas próximas páginas existe um apanhado de todas estas classes de dispositivos.

### III.3.1 - Lasers

O termo "laser" significa "light amplification by stimulated emission of radiation" (amplificação de luz por emissão estimulada de radiação). Durante algum tempo o laser foi considerado uma invenção que precisava de uma aplicação, pois as diversas aplicações imagináveis eram limitadas por obstáculos diversos [15]. A possibilidade de se construir um laser foi proposta no final da década de 50, mais especificamente em 1958, por Townes and Schawlow[16]. Na realidade o próprio Townes já trabalhava antes com masers ("microwave amplification by stimulated emission of radiation" ou amplificação de microondas por emissão estimulada de radiação). A implementação do laser foi obtida por Maiman [16] através de um dispositivo de cristal de rubi. Mais tarde, um ano depois, foi reportada a obtenção do primeiro laser CW ("continuous wave" ou ondas contínuas) por Javan, utilizando He-Ne (Hélio Neônio) [16].

Nos próximos itens descreveremos a tecnologia do laser, dando prioridade aos lasers semicondutores.

### III.3.1.1 - Princípios de Funcionamento

O funcionamento de um laser está relacionado às formas com que os fótons incidem em um átomo, modificando os níveis de energia dos elétrons presentes em uma estrutura atômica [18]. Infelizmente não podemos nos ater em detalhar a teoria dos níveis de energia de um átomo ou molécula. A apresentação e a discussão de tópicos como Equação de Schrodinger [18], transição entre estados de energia e outros, apesar de serem base para a compreensão completa do funcionamento de um laser, seria por demais desgastante e contraproducente frente aos objetivos deste trabalho. Podemos apenas dizer que, para a nossa análise, devemos considerar que um átomo possui diversos níveis de energia e que as chamadas bandas de valência e de condução presentes em uma estrutura atômica complexa como a estrutura de um sólido são correspondentes aos níveis energéticos de um átomo simples. Estas bandas de energia são a representação estatística da probabilidade de se encontrar um elétron num determinado nível energético.

A disposição destas bandas entre si pode determinar se um material é condutor, isolante ou semicondutor. Um sólido que tem somente bandas completamente ocupadas por elétrons é um isolante se o intervalo de energia entre a última banda ocupada (chamada banda de valência) e a banda permitida permitida seguinte (chamada banda de condução) for grande [18]. Caso o intervalo entre uma banda de valência e uma de condução for pequeno o sólido é um semicondutor. Se as bandas de condução e valência se sobrepõem ou se "tocam", ou caso a banda de valência seja separada da banda de condução mas não

esteja totalmente preenchida, o sólido é um condutor, pois os elétrons presentes na banda de valência podem transitar em espaços vazios nas bandas energéticas (figura III.2).

Para o entendimento do efeito laser podemos utilizar os fenômenos de absorção, espalhamento e emissão estimulada, que estão relacionados à incidência de um fóton sobre um átomo ou molécula. A discussão pode parecer um pouco árida demais mas é necessária. Vamos a ela.

Quando um fóton é absorvido por um átomo sua energia contribui para o aumento da excitação de um elétron, ou seja, o elétron passa para um nível de energia maior que o seu nível normal. Logo depois o elétron tende a ocupar novamente seu nível de energia original e faz isto emitindo energia através de um outro fóton. Este processo, ilustrado na figura III.2.a, é chamado de absorção ressonante. Este é um processo de duas etapas e o fóton emitido não está relacionado ao fóton incidente, seja em termos de frequência ou fase. Um outro fenômeno do tipo é o espalhamento elástico ou de Rayleigh (figura III.2.b), que acontece em uma só etapa e em que o fóton incidente está relacionado com o fóton emitido ou espalhado (à emissão de um fóton damos o nome de espalhamento). Este relacionamento entre fóton espalhado e incidente também existe no processo de espalhamento inelástico, que ocorre em uma etapa e está na figura III.2.c. Neste fenômeno o elétron tem níveis de energia inicial e final diferentes. Note-se que o fóton espalhado pode ter menor energia que o fóton incidente ou ele pode ter energia maior caso a molécula excitada esteja num nível de energia vibracional ou rota-

cional excitado. Na figura III.2.d temos o efeito fotoelétrico, que ocorre quando a absorção de um fóton (em interação com elétron fortemente ligado) acaba por ionizar o átomo ou molécula sem a posterior emissão de energia através de um fóton e na figura III.6 temos o chamado espalhamento de Compton, em que um fóton atinge um átomo ou molécula, interagindo com um elétron de ligação fraca, ionizando-a e provocando a emissão de radiação eletromagnética do tipo raio X. Estes são alguns dos fenômenos provocados por fótons que atingem átomos ou moléculas.

O efeito mais importante para os nossos interesses é, no entanto, o fenômeno da emissão estimulada, o princípio físico de funcionamento do laser. Este tipo de processo acontece quando um átomo está em seu estado excitado, ou seja, tem elétrons em níveis de energia maiores que os originais ou fundamentais e o fóton incidente tem energia correta para fazer este elétron "descer" de nível energético, provocando a emissão de um fóton com a mesma energia e com a mesma frequência do fóton incidente, que não é absorvido. Este processo só ocorre quando a energia do fóton incidente for exatamente igual a  $E_2 - E_1$ , onde  $E_2$  é o nível de energia suficiente para a excitação de um átomo e  $E_1$  é o nível energia do estado mais baixo ou estado fundamental, no qual o elétron está "tranquilo" em seu nível de energia normal. Nestas condições o campo eletromagnético oscilante, correspondente à frequência de oscilação do fóton incidente, provoca a emissão de um outro fóton na mesma direção, frequência e fase do fóton incidente. Mas porque o fóton incidente

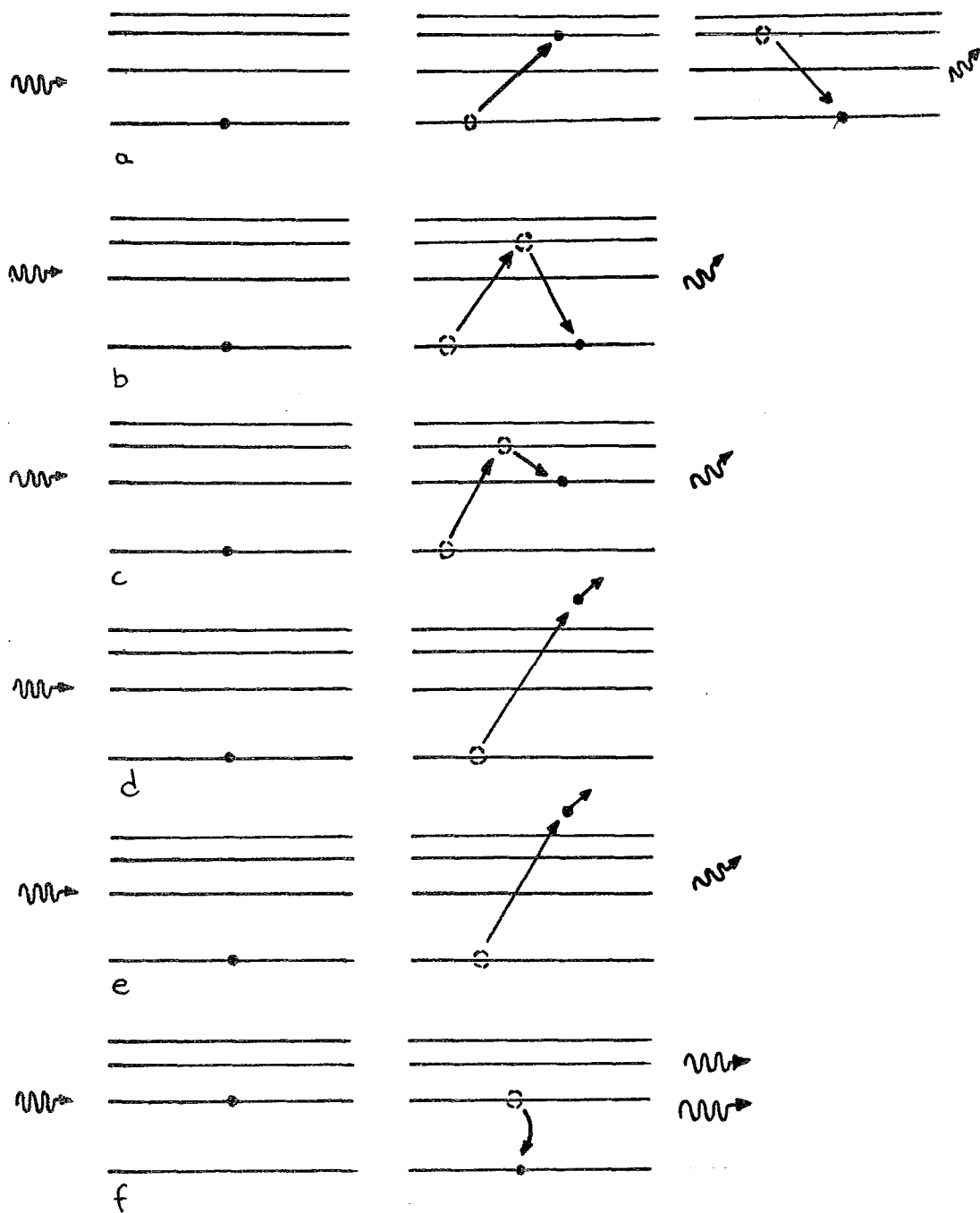


FIGURA III.2. Fenômenos nos níveis de energia  
 a. Absorção ressonante; b. espalhamento elástico; c. espalhamento inelástico; d. efeito fotoelétrico; e. espalhamento de Compton; f. emissão estimulada [18].

não é absorvido, como nos outros casos? As probabilidades de que ocorra a absorção em vez da emissão estimulada foram calculadas por Einstein e ele concluiu que a probabilidade de estimular uma transição de um nível de energia  $E_2$  para um nível de energia menor  $E_1$  é a mesma probabilidade que existe para ocorrer uma absorção do estado  $E_1$  para o estado  $E_2$ , quando o átomo passa para um estado excitado. Entretanto, a amplificação por emissão estimulada depende da possibilidade de se obter mais elétrons no estado mais alto que no estado mais baixo. Esta situação é chamada de inversão de população. Neste caso os fótons não absorvidos podem interagir com elétrons na banda de condução e induzi-los à recombinação com buraco, com emissão de fótons de energia e fase idênticas àquela que estimulou a recombinação [23]. Na medida em que a emissão estimulada exceder a absorção, temos o chamado ganho óptico. O rendimento óptico é a relação entre as taxas de recombinação estimulada e espontânea.

A emissão estimulada tem grande importância porque o sinal luminoso formado por estes fótons é constituído de luz coerente, ou seja, luz formada por fótons de fases idênticas emitidos por diversos átomos. Este tipo de radiação coerente é a grande característica do laser, além da forte direcionalidade da luz emitida. A luz a que estamos acostumados no dia a dia é gerada por fótons que não estão em fase por serem emitidos por átomos independentes, sendo emitida em todas as direções. A luz normal é chamada luz incoerente ou não-coerente.

Os fótons, num laser, se encontram confinados numa re-

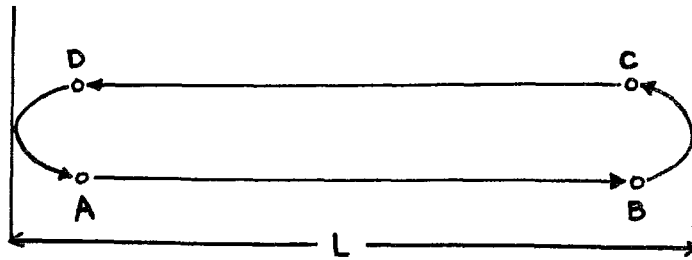


gião do componente chamada cavidade óptica, onde o sinal luminoso é gerado pela emissão estimulada já descrita acima, também chamada de recombinação estimulada de portadores. Quanto maior for a taxa de recombinação maior o ganho óptico, que é a relação entre o número de fótons coerentes gerados frente ao número de elétrons excitados. Dentro da região ativa a luz passa a oscilar devido à reflexão que sofre em duas de suas faces que agem como espelhos: um deles totalmente reflexivo e o outro parcialmente reflexivo. Na figura III.3 vemos que a região ativa nada mais é que um oscilador óptico. Conforme a intensidade da oscilação da luz dentro da região ativa aumenta, a face espelhada, que não é totalmente reflexiva, passa a deixar sair luz coerente e é este feixe luminoso que sai da região ativa o principal ator de uma série de aplicações.

#### III.3.1.2 - Tipos

Os lasers podem ser classificados de acordo com a natureza do material empregado na sua cavidade óptica, ou seja, se esta é constituída por um gás (chamados de lasers a gás), um líquido, um sólido cristalino não semicondutor (chamados de lasers de estado sólido) ou um sólido semicondutor (chamados de lasers semicondutores). Os materiais têm grande importância na determinação da faixa de potência em que o laser pode operar, assim como no comprimento de onda na qual esta potência pode ser efetivamente atingida.

A tabela abaixo III.1 expõe de uma forma clara os diversos tipos de lasers, seus comprimentos de onda, potência



Intensidade inicial da luz em "A" =  $I_0$   
 Intensidade da luz em "B" =  $I_0 e^{g'L}$   
 Intensidade da luz em "C" =  $RI_0 e^{2g'L}$   
 Intensidade da luz em "D" =  $RI_0 e^{2g'2L}$   
 Intensidade da luz em "A" =  $R^2 I_0 e^{2g'2L}$

FIGURA III.3. A região ativa como oscilador óptico ( $g'$  = ganho óptico médio,  $R$  = coeficiente de reflexão) [23].

e tamanho.

LASER	TIPO	Comprim. Onda	POTÊNCIA	TAMANHO
Excimer	gás	193 a 351	0.01 a 1 J	G
Argônio	gás	257 a 514	0.01 a 20 W	M,G
Hélio-Cádmio	gás	325 a 442	0.001 a 0.075W	M
Nitrogênio	gás	337	<0.001J	M
Diodo duplo	semicond.	432	0.001 a 0.01W	M
Vapor de cobre	gás	510 a 578	<0.005 J	L
YAGl duplo	solid state	532	0.001 a 2W <0.001 a 0.5J	M,G
Vapor de ouro	gás	628	<0.002 J	L
Neon Hélio	gás	632	0.001 a 0.1W	M,G
Kripton	gás	647 a 676	0.1 a 5W	M,G
Safira-titânico	solid state	670 a 1040	0.1 a 3W	L
InGaAlP2	semicond.	680	0.001 a 0.01W	F
Rubi	solid state	694	1 a 100 J	M,G
Diodo GaAlAs3	semicond.	780 a 880	0.001 a 1 W <0.001J	P
Diodo GaAs4	semicond.	890 a 1060	<0.0001J	P
Neod. YLF5	solid state	1047	0.02 a 17W <0.001 a 2J	M,G
Neod. YAG	solid state	1064	0.01 a 1000W <0.001 a 2J	M,G
Diodo InGaAsP6	semicond.	1300 a 1550	0.001 a 0.1W <0.000001J	P
Monóxido de carbono	gás	5000 a 7000	3 a 20 W <0.01J	M,G
Dióxido de carbono	gás	9000 a 11000	1 a 5000W 0.1 a 500J	M,G
1Ytrium Aluminium Garnet				
2Indium Gallium Aluminium Phosphide				
3Gallium Aliminium Arsenide				
4Galium Arsenide				
5Ytrium Lithium Fluoride				
6Indium Gallium Arsenide Phosphide				

TABELA III.1: Tipos de lasers. FONTE: Forrest[31]

A classificação de tamanho na tabela III.1 acima é a de "G" para lasers com mais de um metro de comprimento, que necessitam de refrigeração a água e 220 a 440 volts de ali-

mentação; "M" componentes de tamanho moderado, tipicamente nas dimensões de uma caixa de sapatos e alimentação de 110 volts e "P" para lasers pequenos com dimensões da ordem de centímetros ou menos ainda e que operem a baixas voltagens. Note-se que geralmente lasers mais potentes têm dimensões maiores. Isto se deve à necessidade de uma região ativa de dimensões consideráveis para aumentar o ganho óptico do dispositivo e, com isto, gerar sinais luminosos mais potentes. Evidentemente lasers mais potentes necessitam de melhores mecanismos para a dissipação do calor gerado, razão pela qual eles são montados com sistemas de arrefecimento através de água.

A figura III.4 abaixo indica as faixas de comprimentos de onda atingidos pelos diversos tipos de lasers citados na tabela III.1.

Note-se que todos os tipos de lasers podem emitir luz em diversas faixas do espectro. A decisão de se utilizar um laser a gás, estado sólido ou semicondutor se dará basicamente pelas suas características de potência e tamanho segundo as necessidades da aplicação em vista.

Como já foi exposto anteriormente, voltaremos nossas atenções para os lasers semicondutores e de como estes componentes estão reunindo características que os gabaritam a ocupar determinados aplicações anteriormente exclusivas dos lasers a gás e de estado sólido.

#### III.3.1.3 - Lasers Semicondutores e LED's

Discutiremos inicialmente os princípios de funciona-

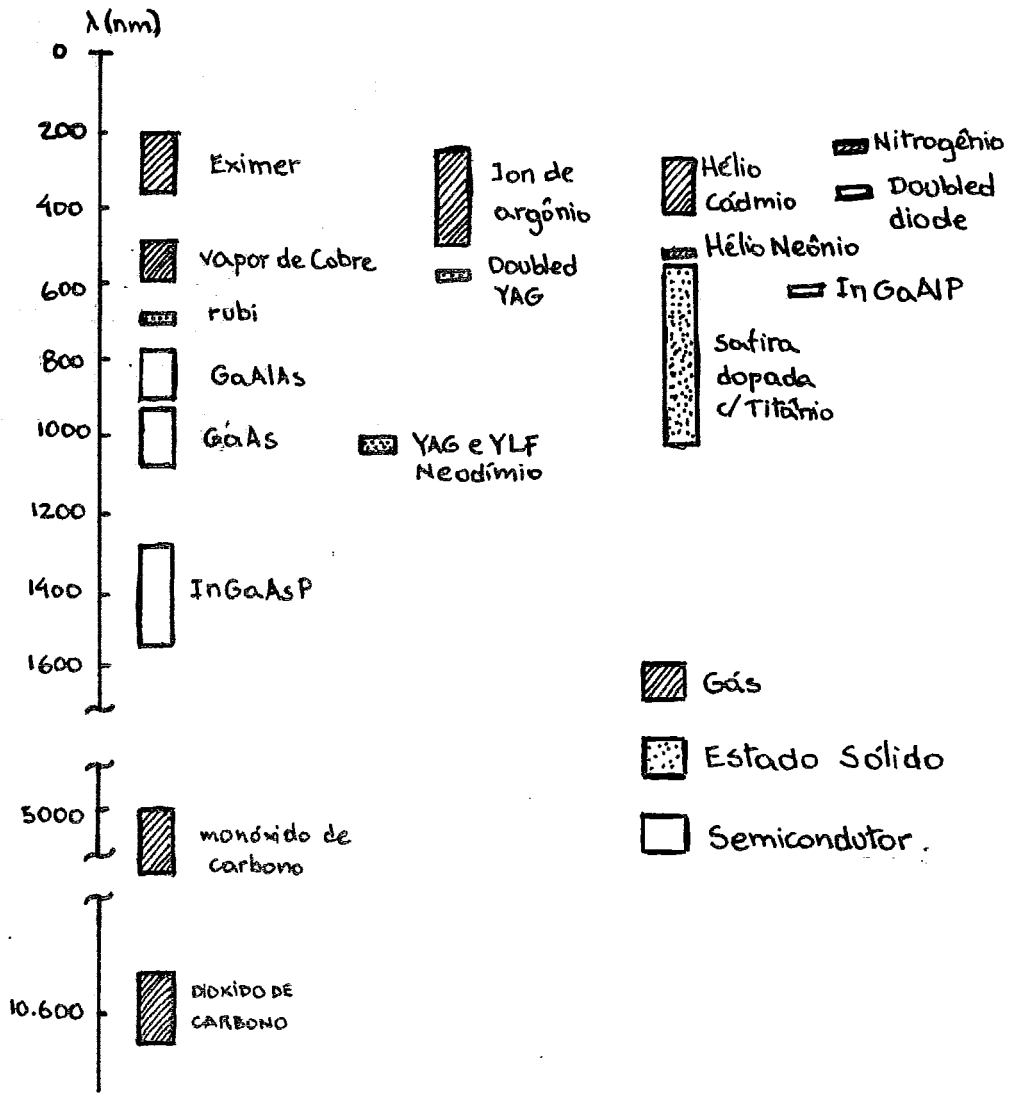


FIGURA III.4. Faixas de comprimento de onda de alguns tipos de lasers [31].

mento dos LED's e dos lasers semicondutores devido às suas semelhanças estruturais básicas. Em sistemas de transmissão de sinais luminosos os LED's e os lasers semicondutores cumprem o papel de fontes luminosas. Estes dispositivos são constituídos de várias camadas de material semicondutor crescido epitaxialmente sobre um substrato cristalino. A sua forma básica é a de uma junção entre dois tipos de material semicondutor: um dopado positivamente, também chamado de "tipo P" (onde os portadores da corrente elétrica são entidades de carga positiva chamadas de forma muito pouco simpática de "buracos") e um dopado negativamente, também chamado "tipo N" (onde os portadores de corrente, de carga negativa, são os já conhecidos elétrons). Quando se aplica uma tensão nesta junção P-N, polarizando-a positivamente, passa corrente pelo dispositivo e começam a acontecer emissões espontâneas de fótons devido à recombinação entre "buracos" e elétrons. A quantidade de recombinações entre elétrons e "buracos" é dependente da tensão aplicada na junção e portanto a luz emitida também segue, grosso modo, as mesmas regras de proporcionalidade. A emissão desta luz é isotrópica, ou seja, dentro da junção a luz se propaga em todas as direções. Por isto apenas uma pequena parte desta luz consegue sair do componente e a quantidade desta luz, assim como sua qualidade, depende fundamentalmente das características geométricas da região onde se dá a emissão de fótons.

A figura III.5 mostra uma junção P-N típica de um LED de diâmetro relativamente grande, usado para introduzir luz em várias fibras ao mesmo tempo. Um outro tipo de LED é mos-

trado na figura III.6, chamado de LED de alta radiância porque foi desenhado para lançar um feixe de luz bastante intenso dentro de uma única fibra óptica.

O caso dos lasers semicondutores é similar ao do LED na medida em que existe uma junção P-N que é diretamente polarizada e que passa a emitir fótons. Entretanto, as semelhanças param por aí. A principal diferença entre um LED e um laser semiconductor é que a luz de um LED não é coerente como a do laser. A energia óptica coerente em um laser é produzida numa cavidade ressonante composta por duas faces clivadas paralelas que cumprem a função dos espelhos citados anteriormente. A clivagem é feita aproveitando-se a própria orientação da estrutura cristalina do semiconductor, garantindo-se o paralelismo das faces opostas. A função desta cavidade é garantir uma direção preferencial para os fótons que seja perpendicular ao espelhos clivados.

As diferenças entre lasers semicondutores e LED's são, basicamente as seguintes:

- os LED's geralmente tem tempo de vida útil maior que a dos lasers semicondutores;
- a estrutura de um LED é mais simples que a de um laser;
- o laser semiconductor é capaz de emitir sinais de maior potência que um LED;
- a capacidade de modulação de um laser é maior que a de um LED;
- o espectro de emissão de um laser semiconductor é



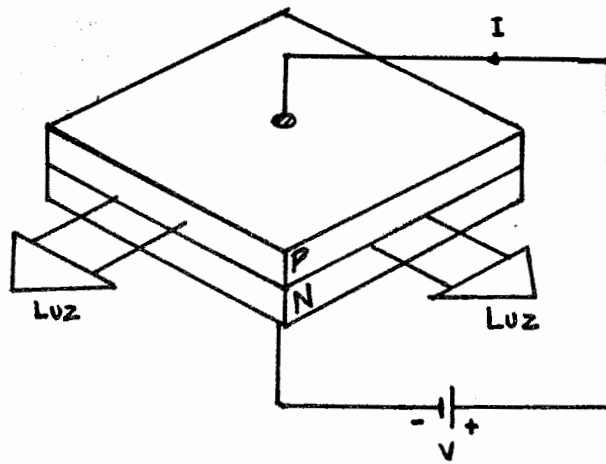


FIGURA III.5. Junção PN típica em um LED [23]

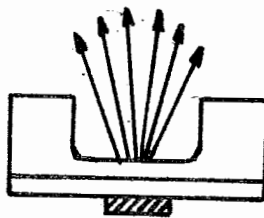


FIGURA III.6. LED de alta radiância [24]

mais estreito que o de um LED;

- o espalhamento da radiação de um laser é menor que a de um LED, ou seja, a luz do laser é mais direcional que a de um LED;

Existem diversas maneiras de se construir um LED, sendo que algumas delas estão ilustradas na figura III.11. Numa delas a luz é emitida pela superfície do dispositivo, chamado de LED eletro-luminescente de emissão pela superfície, também chamado de "Burrus type" e emissor frontal, "front emitter". A emissão da luz neste tipo de LED é pouco direcional, razão pela qual devem ser providenciados meios de obter um acoplamento mais efetivo entre fonte luminosa e fibra óptica. Logo procura-se maximizar a transferência de luz entre LED e fibra através de alguns artifícios, como a colocação da fibra colada à superfície de emissão de luz (figura III.7.a) [19][20][21], de forma que a luz seja lançada imediatamente na fibra. Neste caso um poço é formado por processo de "etching" no substrato do dispositivo, no qual a fibra é colada da forma a receber os sinais luminosos da região ativa. O padrão de emissão é isotrópico, com ângulo de emissão típico de 120°. Outra abordagem seria a ilustrada na figura III.7.b, onde a superfície de emissão tem a forma de uma lente convexa, de forma a fazer com que os raios de luz que saem do LED tenham sua divergência reduzida e, com isto, o acoplamento entre o LED e a fibra é melhorado. [22dutta]

Outra forma de emissão seria a ilustrada na figura III.7.c, onde a luz é emitida pela borda do dispositivo,

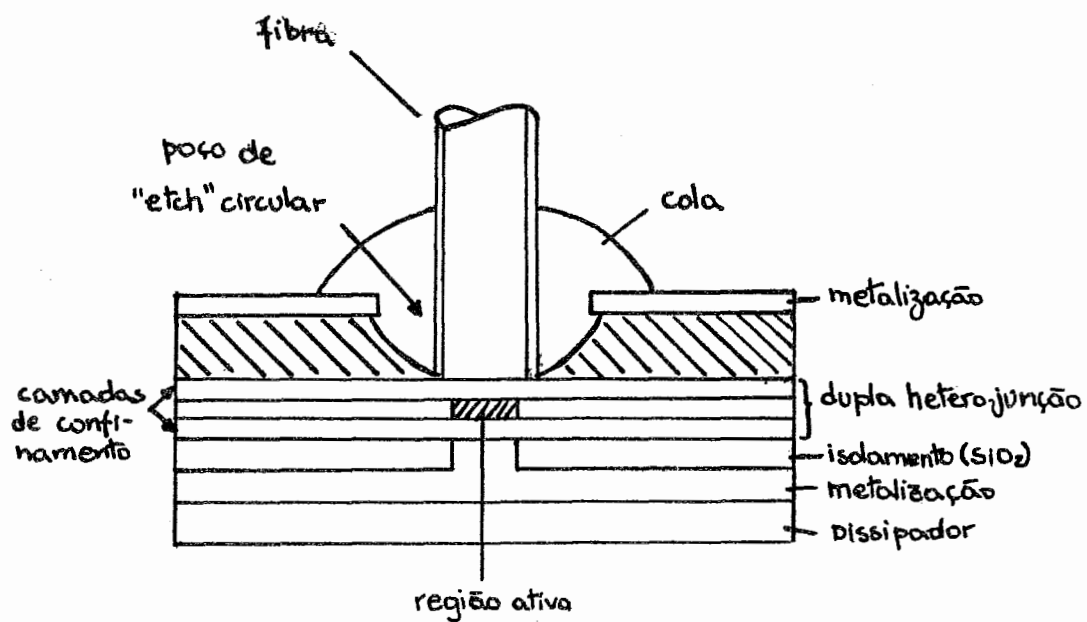


FIGURA III.7.a. LED de alta radiância, com emissão por superfície, com fibra acoplada [22]

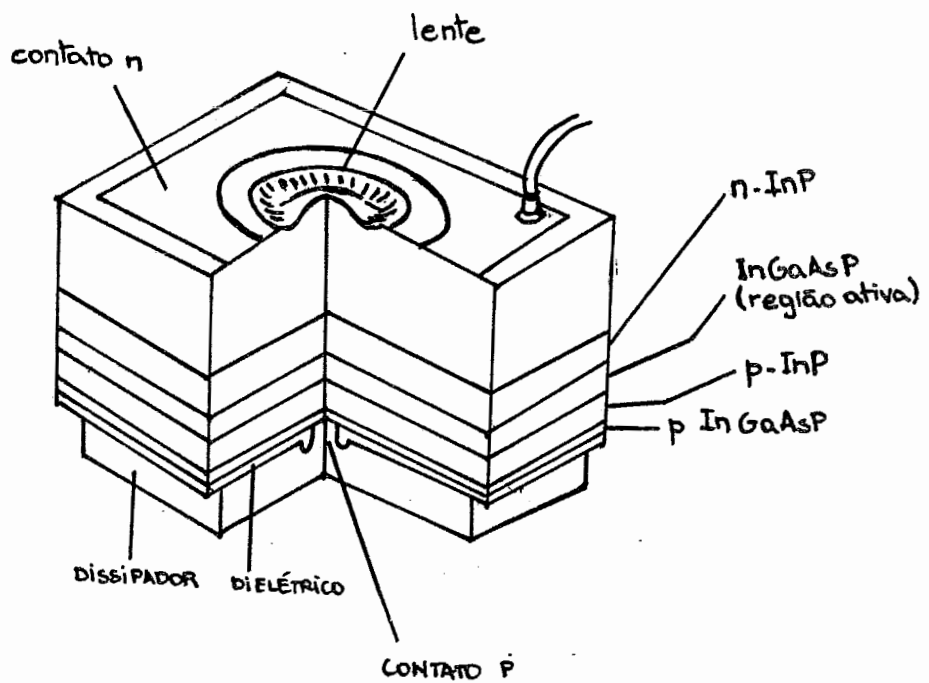


FIGURA III.7.b. LED de emissão por superfície com lente [22]

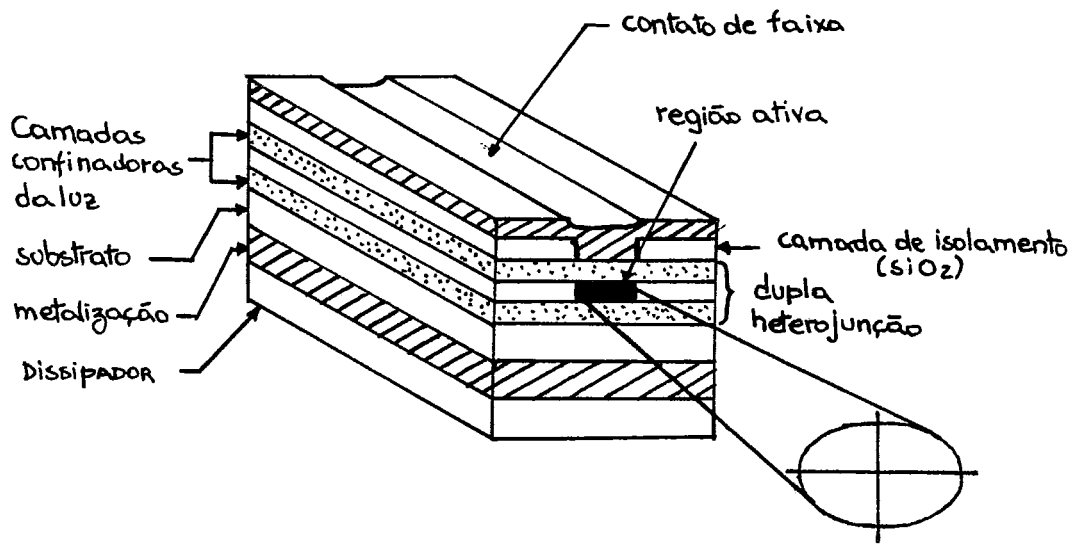


FIGURA III.7.C. Exemplo de LED de dupla hetero-junção com emissão pela borda [21]

paralelamente ao plano da junção.

Nos dispositivos apresentados acima o principal fator diferenciador de desempenho é a direcionalidade, função da geometria utilizada. Assim, LED's de emissão por superfície produzem luz pouco direcional, enquanto que LED's de emissão pela borda são mais direcionais, principalmente no plano perpendicular ao da junção pn, função da espessura existente entre as camadas responsáveis pelo confinamento da luz, indicadas na figura III.8 .[21][20].

Assim como nos LED's, a geometria das camadas semicondutoras é fundamental na determinação do desempenho dos diodos laser. Na realidade, a determinação destas geometrias faz parte da história do projeto destes dispositivos e é o melhor indicativo de sua evolução.

No início era uma simples homojunção, ou seja, uma junção pn feita com um mesmo material[20]. Ao passar uma corrente por esta junção ocorrem recombinações de portadores na sua proximidade, provocando a geração de luz. Para correntes acima de um determinado valor, chamado de "threshold" (limite, limiar), o diodo laser começa a oscilar e emite luz coerente. Antes desta corrente de "threshold", ocorre a emissão espontânea, com pequena potência e luz incoerente (como um LED).

A geração da luz numa junção semicondutora é isotrópica, ou seja, se dá em todas as direções. Logo, é preciso

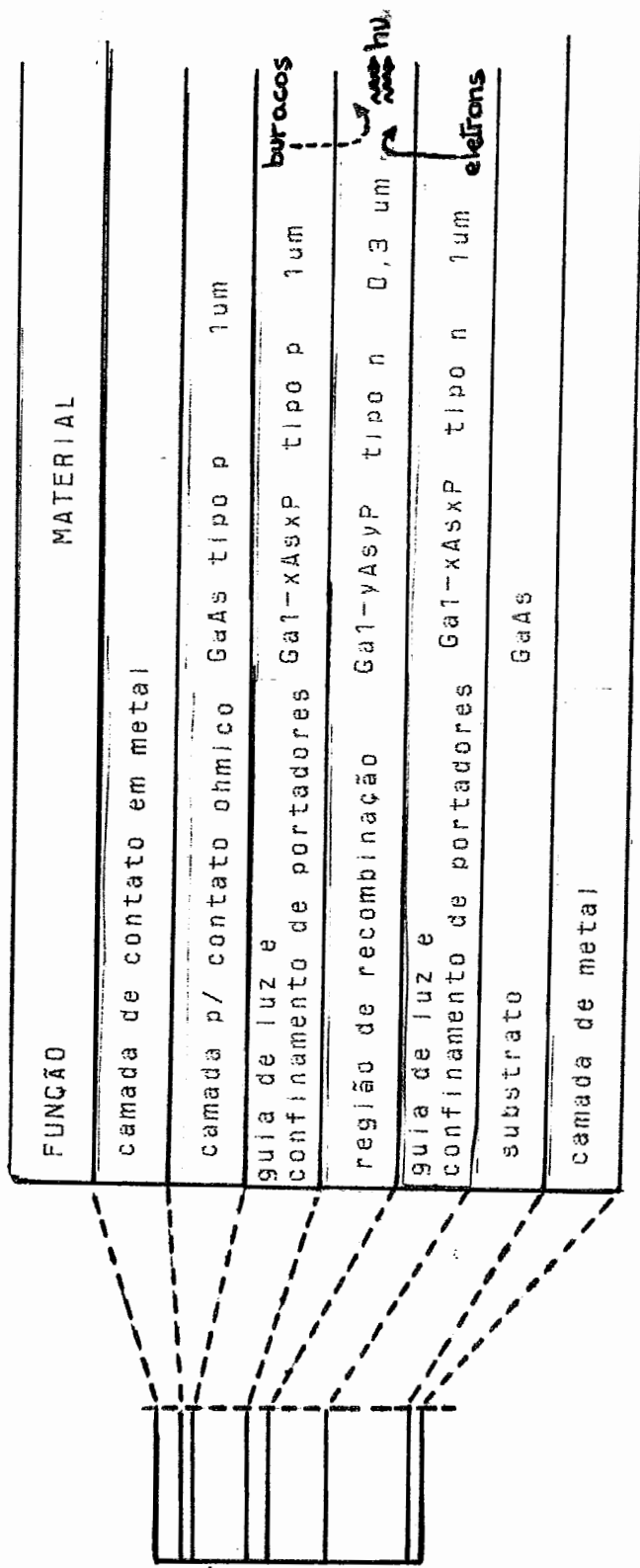


FIGURA III-8. Camadas de um laser semiconductor e suas funções.

confinar a luz de modo que ela seja adequadamente direcionada e menos energia seja desperdiçada. O confinamento da luz é feito através do estabelecimento de "corredores" de luz gerados pela disposição de diferentes camadas de material semicondutor com diferentes índices de refração, sendo que as camadas com a função de confinar a luz devem ter índices de refração menores que aquele da camada confinada. Desta forma a luz gerada será refletida de volta na fronteira entre as camadas. Quanto maior for a diferença de índices de refração maior será o confinamento, pois a luz presente na camada confinada tenderá a se refletir de volta com maior facilidade.

Além disto, pode-se confinar os portadores através de barreiras de potencial, outro mecanismo para se aumentar a eficiência do laser.

No caso do laser de homojunção de GaAs a luz gerada reflete-se em todas as direções e conseqüentemente o confinamento da luz é fraco. Isto acaba por prejudicar a eficiência do laser, razão pela qual a densidade de corrente de limiar (a partir do qual se inicia a emissão de luz no laser) é muito alta, tipicamente  $10^5$  A/cm<sup>2</sup>, gerando grande quantidade de calor e impossibilitando sua operação à temperatura ambiente [23].

Mais tarde chegaram os lasers de heterojunção de GaAlAs, onde a junção semicondutora da região ativa era feita entre dois materiais diferentes como, por exemplo, arseneto de gálio e arseneto de gálio alumínio (GaAs e GaAlAs). A estrutura de dupla heterojunção (GaAlAs/GaAs/GaAlAs) possibi-



litou a obtenção de menores correntes de limiar e por isto o seu consumo energético e dissipação de potência são melhores que os do laser de homojunção, podendo inclusive operar a temperatura ambiente [20][24]. A figura III.9 mostra a estrutura básica de um laser de heterojunção. A região central, formada por GaAs dopado positivamente (tipo p), faz fronteira com duas camadas de GaAlAs, uma dopada positivamente e outra dopada negativamente (tipo n). A interface entre estas camadas cria um guia óptico onde os ftons e eletrons são confinados devido à diferença do índice de refração entre os dois materiais e pela barreira de potencial (figura III.10), aumentando a eficiência do dispositivo. Consegue-se assim diminuir a densidade de corrente de limiar até  $10^3$  A/cm<sup>2</sup> [23]

Além das melhorias associadas ao advento das heterojunções, pode-se dizer que uma prática que se tornou universal no projeto e fabricação de lasers semicondutores é a colocação de contatos de faixa ("stripe geometry"). O contato de faixa, mostrado na figura III.11, é colocado numa janela de material isolante (SiO<sub>2</sub> por exemplo) e sua principal função é limitar a atuação da corrente elétrica de modo que apenas naquela pequena e estreita faixa ocorra a excitação da região ativa [23][20]. Quando um laser semiconductor é excitado por um eletrodo de dimensões muito largas o que ocorre é que a emissão da luz do laser não se dá de maneira uniforme em toda a área excitada, formando-se vários "filamentos laser" [23]. A largura típica de um contato de faixa está entre 10 e 5 micra, permitindo que exista apenas um modo

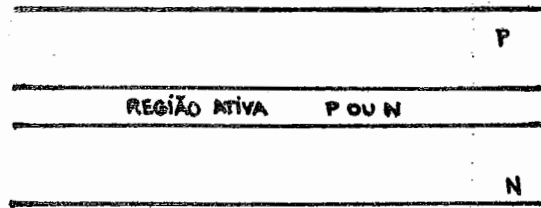


FIGURA III.9. Estrutura básica de um laser de heterojunção

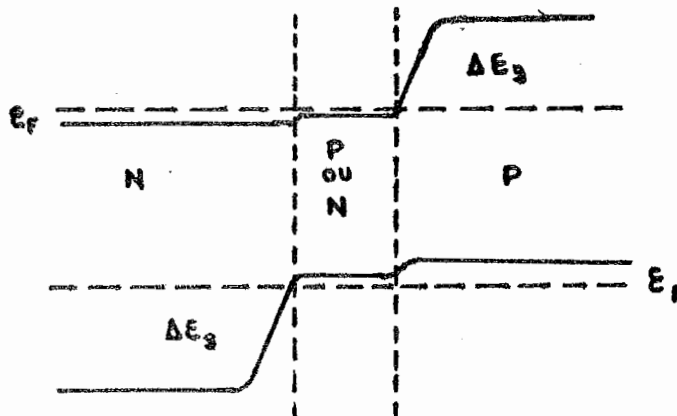


FIGURA III.10. Confinamentos óptico e de potencial [23]

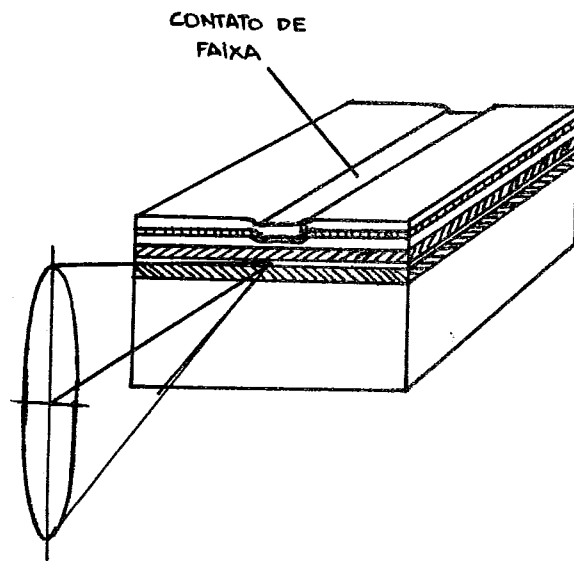


FIGURA III.11. Laser com contato de faixa.  
[24]

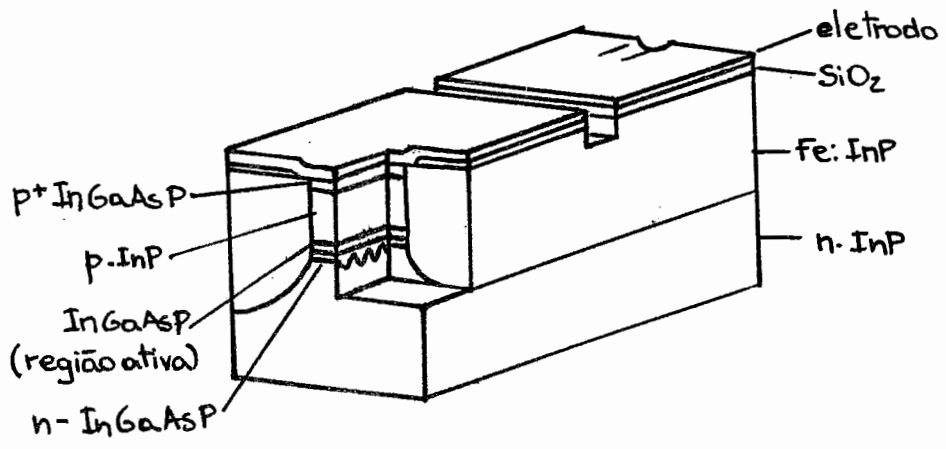


FIGURA III.13. Exemplo de Laser de Realimentação Distribuída.[22].

luminoso, ou seja, apenas um tipo de "filamento laser", diminuindo o consumo de corrente [20] Apenas para exemplificar, digamos que num laser de dimensões típicas ( 0,4 mm por 0,25 mm) a área excitada por um contato largo seja de  $10^{-3}$  cm<sup>2</sup>. Num laser de mesmas dimensões, mas com um contato de faixa com largura de 10 micra, teríamos uma área excitada de 400 micra por 10 micra, ou seja,  $4 \cdot 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>. Assumindo uma densidade de corrente de limiar de 1,5 KA/cm<sup>2</sup>, no primeiro caso necessitaríamos de uma corrente de limiar de 1,5 A e, no segundo caso, de 60 mA. Obviamente o consumo do segundo, fabricado com contato de faixa, é bem menor do que o primeiro, além de ser muito mais fácil lidar com correntes da ordem de mili-ampéres do que com ampéres.

Existem vários tipos de geometrias de construção de lasers semicondutores baseados em contatos de faixa, como:

- "planar stripe";
- "mesa stripe";
- "heteroisolation stripe";
- "buried heterostripe";
- "natural oxide stripe";
- etc.

A estrutura "planar stripe", ou faixa plana, é mostrada na figura III.12. A quarta e quinta camadas são do tipo N, enquanto que as três superiores foram dopadas com zinco para serem do tipo P (note-se que a primeira camada originalmente era do tipo N na região do contato de faixa). Neste caso o contato de faixa foi feito através desta dopagem.

No caso do "mesa stripe" (contato em forma de ... me-

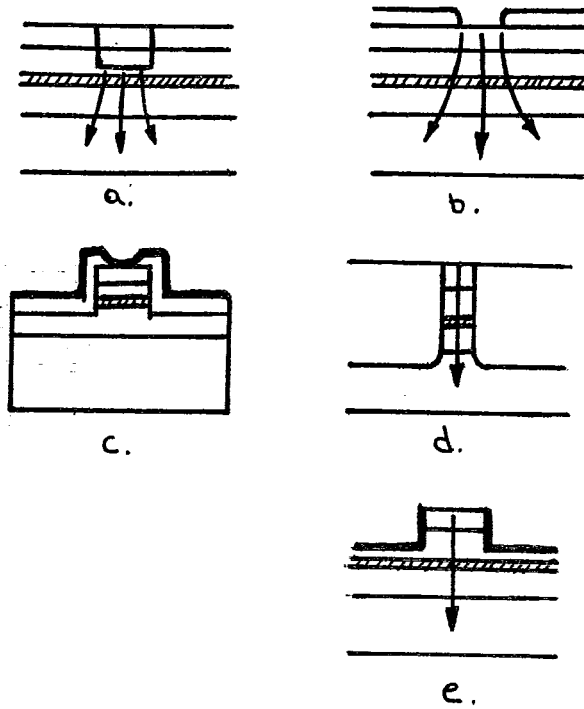


FIGURA III.12. Algumas geometrias de para lasers semicondutores [20].

- a. Planar Stripe
- b. Hetero Isolation Stripe
- c. Mesa Stripe
- d. Buried Hetero Stripe
- e. Oxidized Stripe

sa!) as camadas superiores foram removidas exceto no lugar do contato de faixa.

O tipo "heteroisolation stripe", que atende em português pelo exótico nome de faixa de hetero-isolamento, é feito através de um "etch" seletivo na camada de GaAlAs tipo N, que é na realidade uma barreira para a corrente de elétrons. A corrente é "espremida" através deste buraco até a região ativa.

Uma estrutura muito utilizada é a "buried heterostripe" ou "buried heterostructure", que une as vantagens de confinamento superficial proporcionada pelo princípio dos contatos de faixa ao confinamento lateral, provocado pelo crescimento epitaxial de duas regiões de GaAlAs em cada lado da estrutura de heterojunções. É como se o contato de faixa fosse realmente "enterrado" na heteroestrutura cristalina. O resultado é que esta estrutura "confina" muito bem os fótons e os elétrons nos limites transversais da heterojunção, emitindo luz a partir de uma área de 1 micra de lado. A corrente de limiar neste tipo de geometria é muito baixa, tipicamente 10 mA.

Um modelo de laser com estrutura deste tipo é descrito em [22](figura III.12d). Neste caso o nome que deram para a geometria do dispositivo foi o original "channeled-substrate buried heterostructure" ou hetero-estrutura enterrada em forma de canal no substrato... Neste caso a emissão de luz é efetuada pela minúscula camada de InGaAsP (medindo 1,5 x 0,15 micra), engastada quase no fundo de um sulco em forma de "V".

O "natural oxide stripe" (não, não é mais um produto na onda ecológica) mostrado na figura III.12c consiste num contato do tipo mesa onde toda a superfície do laser é oxidada, exceto na área do contato de faixa.

Um tipo de laser em voga ultimamente é o do tipo realimentação óptica distribuída, ou DFB - "distributed feedback" (fig III.13). Com este tipo de dispositivo torna-se possível emitir luz sem a largura espectral encontrada em outras geometrias. Isto é possível devido à rede holográfica existente em sua estrutura e que permite abrir mão das superfícies refletoras de um laser de estilo Fabry-Perrot pois a reflexão da luz é proporcionada pelos "sulcos" existentes na região ativa. O espaçamento destes "sulcos" determina a frequência em que a luz vai ser emitida pois apenas as frequências coincidentes com os períodos da rede holográfica serão realmente refletidas, num "feedback" óptico. A seleção da frequência emitida por este método é excelente, gerando um sinal de apenas uma única frequência em 1,55 nm e aí está a principal vantagem deste tipo de laser. Conforme veremos no item sobre fibras ópticas, um dos pontos de menor atenuação de sinal ao longo do espectro eletromagnético está na região dos 1,55 nm. Portanto, levando-se em conta apenas esta variável - a atenuação - pode-se dizer que esta é a frequência ideal de transmissão de informações num sistema de comunicações ópticas, pois menor atenuação do sinal implica em maior espaçamento de estações repetidoras, o que, por sua vez, implica em menores custos de instalação e manutenção por quilômetro instalado. Entretanto, em fibras ópticas pa-



drão a dispersão cromática no comprimento de onda de 1,55 nm é bastante significativa, razão pela qual é necessário que a fonte de luz, no caso o laser, emita em apenas uma frequência. Os diodos laser que não tem este tipo de estrutura emitem luz em vários comprimentos de onda e portanto seu sinal é degradado pela dispersão cromática da fibra óptica: os pulsos tendem a se alargar com maior facilidade pois as diferentes frequências levam tempos também diferentes para se propagarem ao longo da fibra o resultado é que no ponto da recepção o formato do pulso é muito diferente do original.

A primeira geração de diodos lasers era feita com GaAs e GaAlAs porque estes materiais emitiam luz com comprimento de onda na faixa de 800 a 900 nm, localizado na primeiro mínimo de atenuação das fibras ópticas, chamado de 1ª janela. Diodos laser de segunda e terceira gerações, feitos com materiais como InP e InGaAsP, são capazes de emitir em comprimentos de onda equivalentes à 2ª e 3ª janelas, ou seja, 1.300 nm e 1.550 nm, respectivamente. Para maiores detalhes é melhor consultar o item sobre fibras ópticas mais adiante.

### III.3.2 - Fotodetectores

Fotodetectores são dispositivos voltados para a conversão de sinais luminosos em sinais eletrônicos. Existem diversos tipos de fotodetectores, como fotocélulas, também chamadas de LDR ("light-dependent resistor"), células solares, fotodiodos a vácuo e semicondutores, fotomultiplicadores e fototransistores. Concentraremos nossas atenções nos fotodiodos semicondutores.

Geralmente os fotodiodos semicondutores são dispositivos muito simples difundidos em silício. Existem, entretanto, componentes deste tipo feitos em materiais compostos como InP, InGaAs, etc., que podem atuar em diferentes faixas de comprimento de onda.

O princípio básico de operação de um fotodiodo consiste simplesmente na geração de uma corrente, entre seus terminais, proporcional à quantidade de luz presente na face sensível do dispositivo. Esta face sensível é fabricada aplicando-se à superfície do substrato uma difusão bastante forte de material de tipo oposto ao do substrato (se o substrato for feito de silício dopado negativamente N+, por exemplo, a difusão será feita de forma a se obter numa parte de sua superfície uma camada de material dopado positivamente P+). Um anel de material metálico para contato é feito em torno da região difundida que passa a ser a região de recepção de raios luminosos [22]. A figura III.15 mostra um esquema simplificado deste tipo de componente.

Existem dois tipos básicos de fotodiodos semicondutores: positivo-intrínseco-negativo - PIN e diodos avalanche ("avalanche photodiode - APD").

A estrutura de um fotodiodo tipo PIN consiste de duas regiões p e n separadas por uma região levemente dopada tipo n, chamada de camada intrínseca (daí o nome PIN). Este fotodiodo precisa de níveis de dopagem muito baixos em sua camada "intrínseca", além de uma espessura suficientemente grande para assegurar uma boa eficiência quântica, ou seja, um maior número de pares de elétrons e "buracos" gerados por

cada fóton incidente.

Quando um fóton atinge esta região com energia suficientemente maior que a energia de separação das bandas de valência e condução ele consegue excitar um elétron, fazendo-o pular da banda de valência para a de condução. Este processo gera pares de portadores (um elétron e um "buraco") chamados fotoportadores [21] porque são gerados através da incidência de fótons sobre o componente. Estes portadores geram então uma corrente que pode ser utilizada por um circuito externo que passará a processá-la. Quanto maior a incidência de luz sobre o fotodiodo maior a geração de fotoportadores e portanto maior o fluxo de fotocorrente. As figuras III.15a e III.15b. ilustram a estrutura de um fotodiodo PIN e seu diagrama de energia, respectivamente.

A fotodeteccção nos fotodiodos avalanche acontece pelo aumento da energia cinética dos portadores gerados pela incidência de fótons. Para a corrente ser multiplicada os portadores elétricos (os elétrons e os "buracos") devem atravessar uma região onde o campo elétrico é razoavelmente forte. A aceleração que este campo elétrico forte provoca nos portadores acaba por provocar colisões com os elétrons presentes na estrutura cristalina do material. Assim, os elétrons que estavam sossegados em suas respectivas bandas de valência são arrancado de sua posição inicial e jogados na banda de condução. Este processo é chamado ionização de impacto. Estes novos portadores também sofrem o efeito do campo elétrico forte e se aceleram, colidindo com outros elétrons, que por sua vez também serão arrancados da banda de

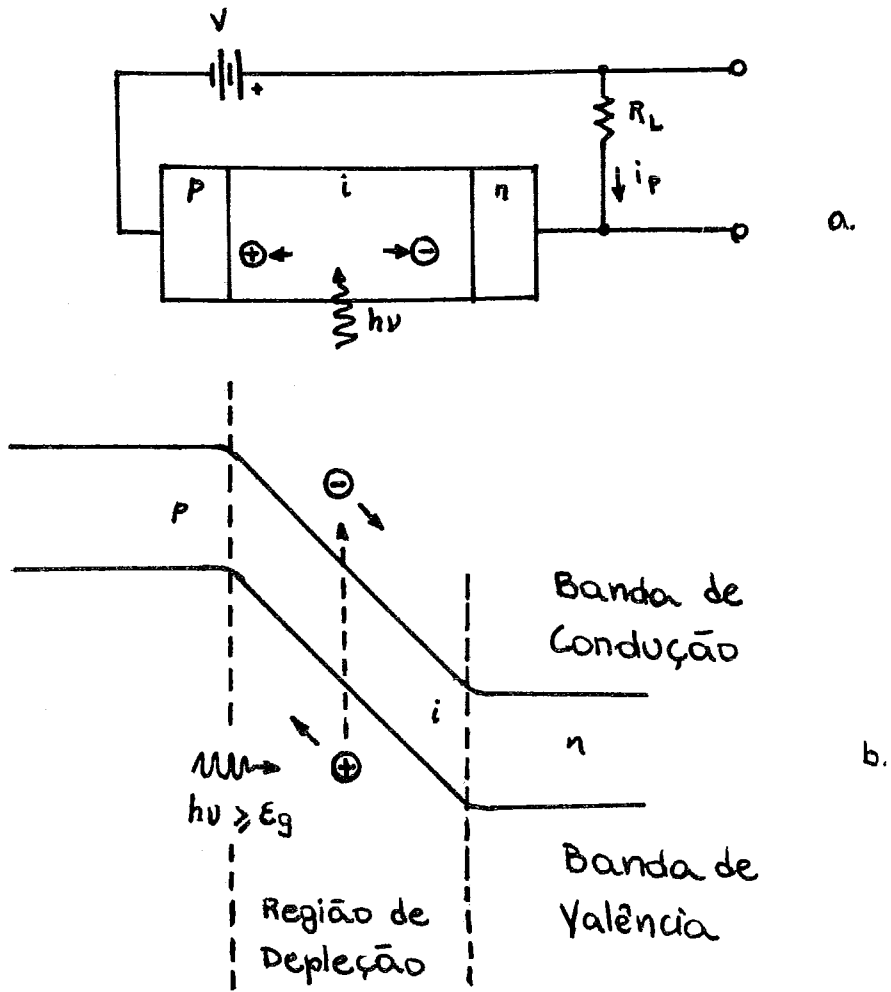


FIGURA III.15. Esquema de fotodiodo PIN e seu diagrama de energia [217].

valência, etc., num efeito multiplicador conhecido como avalanche. Daí o nome de fotodiodo avalanche. Se por um lado este efeito é interessante, na medida em que se pode detectar sinais mais fracos que de outro modo não seriam percebidos, por outro existem problemas relacionados ao excessivo ruído gerado por estes componentes [24][25]. É que o fotodiodo APD amplifica não apenas o sinal oriundo da incidência de luz mas também o ruído não relacionado à recepção de fótons. Este ruído, também chamado de "shot noise", tem três componentes básicas que são o ruído de "background", o ruído quântico e a corrente de escuro (a corrente de escuro é a corrente que um fotodiodo gera mesmo sem ser iluminado, ou seja, mesmo sem a incidência de fótons). Muitas vezes é preferível a utilização de um fotodiodo com espectro de ruído menos problemático como o PIN do que a utilização de um APD [24], mesmo que a sensibilidade seja um pouco diminuída. Na figura III.16 temos uma representação esquemática de um fotodiodo APD com a intensidade dos campos elétricos em seu interior. Em Rego [25] temos uma discussão mais detalhada dos efeitos do ruído tanto nos fotodiodos APD quanto nos fotodiodos PIN.

Os materiais utilizados para a construção de fotodiodos variam bastante. Tudo depende do nível de resposta ou sensibilidade que se procura obter, além da eficiência quântica (relação entre o número de pares elétron-buraco gerados e o número de fótons incidentes) [25]. Em termos simples, a máxima sensibilidade que pode ser obtida em um fotodiodo, assim como a maior eficiência quântica, são obtidas utili-

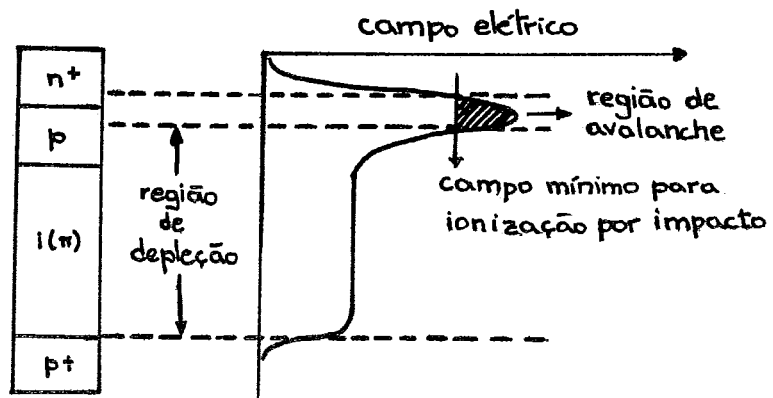


FIGURA III.16. Esquema de fotodiodo APD e o distribuição do campo elétrico em seu interior [21].

zando-se um material em que a energia da banda proibida (o intervalo energético entre a banda de valência e a de condução) seja um pouco menor que a energia dos fótons do maior comprimento de onda que se quer detectar [21]. Vários materiais podem ser utilizados na faixa de operação entre 800 e 900 nanômetros: Si, Ge, GaAs, InGaAs e InGaAsP. O mais utilizado é o silício porque tem tecnologia bem desenvolvida e o menor ruído multiplicador de avalanche. A utilização do silício se torna pouco recomendável na medida em que se procuram faixas de operação para comprimentos de onda acima dos 1,1 micrômetros, situação dos sistemas de comunicações ópticas de 2ª e 3ª geração que operam em comprimentos de onda de 1,3 e 1,55 micrômetros, respectivamente. Nesta faixa de operação a resposta do silício é muito pequena na medida em que os fótons nestes comprimentos de onda não têm energia suficiente para fazer com que os elétrons ultrapassem a banda proibida de 1,17 eV do silício [21]. Daí a utilização crescente de materiais compostos terciários e quaternários para a fabricação de fotodetectores para aplicações deste tipo. Nesta faixa de operação, entre 1,0 a 1,65 micrômetros, são utilizados materiais como Ge, InP, InGaAsP, GaSb, GaAlSb, GaAlAsSb, HgCdTe e InGaAs. A figura III.17 mostra alguns fotodiodos feitos com materiais compostos [22].

### III. 3.3 - OEIC'S

OEIC é a abreviatura de "optoelectronic integrated circuit" (circuito integrado optoeletrônico). Estes circuitos integrados congregam elementos que são fontes de luz,

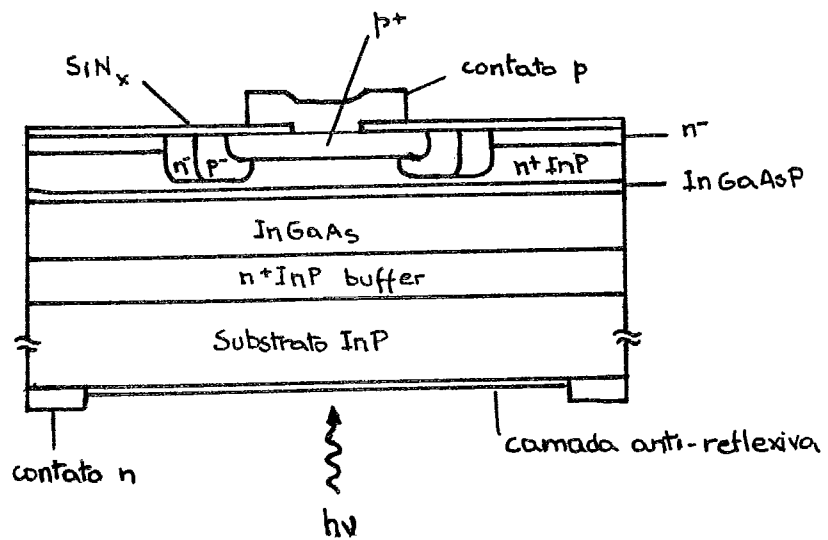
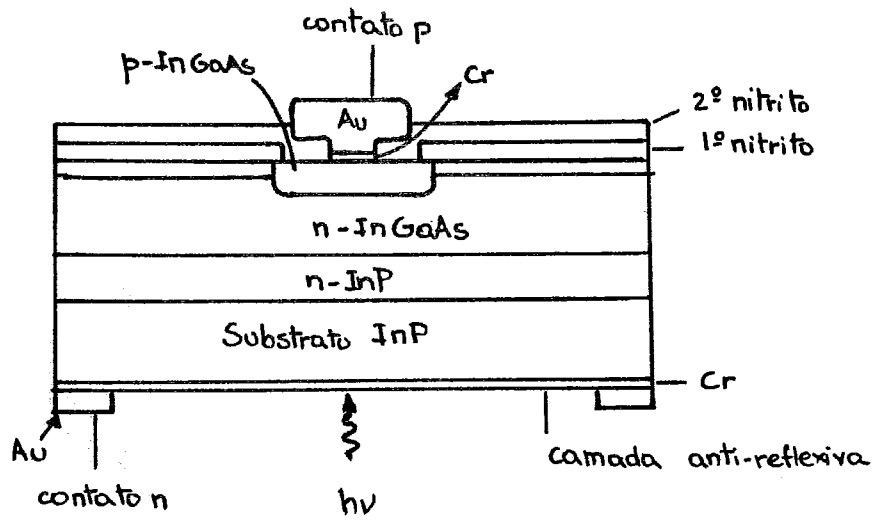


FIGURA III.17. Alguns fotodiodos com materiais compostos. [22].



como por exemplo lasers semicondutores, e detectores de luz, além de dispositivos eletrônicos, todos num só substrato de material semicondutor.

As principais vantagens da utilização deste tipo de componentes residem na sua capacidade de obter grandes velocidades de processamento e transmissão de dados, potencialmente em torno de 5 gigabits por segundo [26], devido à utilização de sinais luminosos. A possibilidade de obtenção deste tipo de componente para aplicação em "loops" locais de sistemas de comunicações ópticas a baixo custo tem sido o grande estímulo para a pesquisa de OEIC's. Assim os sinais ópticos viriam, através de fibras, até as casas ou empresas dos assinantes. Detalharemos esta aplicação nos próximos capítulos.

A colocação, em um só "chíp", de fontes de luz, com seus respectivos circuitos controladores, detectores com os respectivos circuitos de recepção e guias de onda entre componentes eletrônicos e fotônicos tem sido o principal fator limitante para a obtenção de produção em larga escala e, portanto, a custos mais baixos, dos circuitos integrados optoeletrônicos. A partir do momento em que os materiais se prestam de forma mais adequada a determinados comprimentos de onda em que operam, é inevitável que um circuito integrado optoeletrônico, onde existem vários tipos de dispositivos extremamente diferentes, seja feito de vários tipos de materiais semicondutores (o que Shibata [26] chamou de "composição de compostos"). A presença desta variedade de materiais semicondutores num OEIC implica, quase sempre, na ocorrência

de vários tipos de problemas nas etapas de processamento, principalmente nas etapas de crescimento epitaxial. A fabricação de tais componentes não é tão fácil como a dos circuitos integrados de silício, por exemplo, onde são obtidos índices de aproveitamento ("yield") maiores graças ao próprio fato de ser empregado um só material semiconductor em todos os dispositivos do componente [Leheny]. Historicamente, entretanto, é razoável supor que a evolução das tecnologias de processamento de semicondutores evolua a ponto de tornar viável economicamente a fabricação deste tipo de circuitos, assim como aconteceu com os componentes de silício, conforme relatado genericamente no item III.1.

Esta variedade de funções encontradas em OEIC's leva à utilização de várias combinações. A mais usual é GaAs (arseneto de gálio) com GaAlAs (Arseneto de Gálio Alumínio) ou InP (fosfeto de índio) com InGaAsP (fosfeto arseneto de de gálio índio). O GaAs emite e recepta luz na faixa do infravermelho próximo, com comprimentos de onda acima da 0,87 micrômetros. O GaAlAs atua na faixa de comprimentos de onda situada entre 0,78 e 0,83 micrômetros. Os composto de In (índio) são ideais [26] na faixa infravermelha de 1,1 a 1,6 micrômetros. É cogitada a utilização de Seleneto de Zinco e Sulfeto de Zinco para os comprimentos de onda de 0,46 e 0,35 micrômetros, respectivamente [26].

Segundo Leheny [27], os primeiros indícios de pesquisa para a implementação de OEIC's começou no final da década de 1970 com a utilização de tecnologia de circuitos integrados de GaAs como base para a construção de integrados optoele-

trônicos. Estas pesquisas se deram no Cal Tech (California Institute of Technology) e o primeiro resultado prático, relatado em [27][28] foi o circuito repetidor ilustrado na figura III.25. Trata-se de um componente rudimentar que engloba um FET, um diodo laser e um fotodetector. A partir deste exemplo pode-se divisar toda uma série de problemas relacionados à fabricação deste tipo de componente.

Os dispositivos neste exemplo tem grandes diferenças tanto estruturais quanto em termos dos materiais empregados. Para começar, a necessidade de se ter, à época, duas faces do laser clivadas para se estabelecer os espelhos de sua região ativa, acabou por limitar a largura do chip ao comprimento da cavidade óptica (tipicamente 150-300 micrômetros). A região ativa fica confinada entre camadas altamente dopadas de semicondutores p e n, pois utiliza-se um laser BH ("buried heterostructure laser", conforme apresentado no item III.3.1.3). Devido à limitação dimensional imposta a todo o circuito pelo comprimento da cavidade óptica tem-se pouco espaço para colocar uma estrutura eletrônica mais complexa que algumas unidades de transistores (no caso, foi colocado um único FET). Este FET, por outro lado, necessita de controle acurado da dopagem do seu canal, assim como da sua espessura, e este tipo de controle é, segundo Leheny [27], incompatível com os altos níveis de dopagem do laser. O diodo, do tipo p-i-n, necessita, ao contrário do laser, de níveis de dopagem muito baixos em sua camada "intrínseca", além de uma espessura suficientemente grande para assegurar uma boa eficiência quântica, ou seja, um maior número de pa-

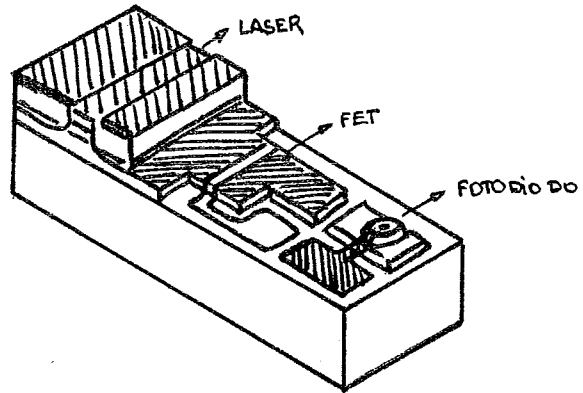
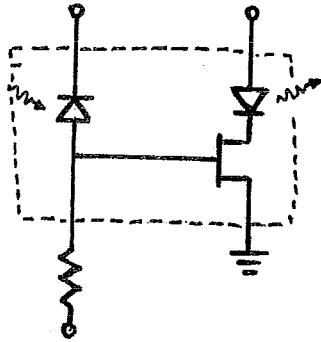


FIGURA III.25. Circuito optoeletrônico repetidor.  
[26][27].

res de elétrons e "buracos" gerados por cada fóton incidente.

Ainda comentando este circuito experimental, podemos notar que a equipe de pesquisadores optou por uma estrutura verticalizada, onde o plano do FET é inferior ao plano do laser semiconductor. Embora este tipo de "arrumação" ajude, segundo Leheny [27], a superar a incompatibilidade entre os materiais, gera descontinuidades e relevos na superfície do "chip" que acabam por dificultar a litografia necessária para implementação de FETs submicrométricos de alto desempenho.

Algumas destas deficiências tem sido corrigidas. Por exemplo, procurou-se colocar um diodo laser que não provocasse a limitação nas dimensões do "chip" conforme descrito acima. Isto pode ser feito pela eliminação da necessidade de clivagem mecânica da estrutura cristalina do semiconductor em um dos "espelhos" da cavidade óptica. Isto pôde ser feito pelo processamento químico, promovendo um "etch" tão anisotrópico quanto possível. Como o espelho obtido a partir deste método não é tão perfeito quanto o obtido através do método de clivagem deve-se esperar uma perda no desempenho do laser, particularmente no limite de emissão estimulada. O problema da superfície com relevos exagerados foi resolvido através da colocação do laser num "poço" obtido através de "etching" do substrato [27].

Em suma, os circuitos integrados optoeletrônicos ainda estão encontrando dificuldades para a realização completa de suas potencialidades devido às diferenças fundamentais de

estrutura e composição entre componentes fotônicos e eletrônicos.

Na tabela III.2 estão relacionadas as empresas que desenvolvem pesquisas no campo dos circuitos integrados optoeletrônicos.

EMPRESA	PAÍS	MATERIAL	MÉTODO	DISPOSITIVO	ESCALA DE INTEGR.	VELOCIDADE Gb/s	ANO
<b>TRANSMISSORES</b>							
HONEYWELL	EUA	GAAS	LPE	MESFET	1LD+180D+180FET	0,15	1983
ROCKWELL	EUA	GAAS	MOVPE	MESFET	1LD+2FET	1,0	1983
HITACHI	JAPÃO	GAAS	MOVPE	MESFET	1LD+1PD+4R+12FET	1,6	1986
FUJITSU	JAPÃO	GAAS	MBE	MESFET	4 x (1LD+1PD+R+3FET)	0,56	1986
MATSUSHITA			JAPÃO		INP	LPE	HBT
NTT	JAPÃO	INP	LPE	JFET	1LD+1PD+2FET	0,12(GHz)	1985
NEC	JAPÃO	GAAS/INP	LPE/MBE	MESFET	1LD+3FET	2,4	1987
TOSHIBA	JAPÃO	INP	MOVPE	MISFET	1LD+1FET	5,0	1988
<b>RECEPTORES</b>							
HITACHI	JAPÃO	GAAS	LPE	MESFET	1PD+2R+5D+3FET	1,6	1986
IBM	EUA	GAAS	MBE	MESFET	1PD+6R+2D+10FET	3,0	1986
	SUIÇA	GAAS	LPE	MESFET	1PD+4FET+2R	5,2 (GHz)	1987
MATSUSHITA			JAPÃO		INP	MOVBE	JFET
NTT	JAPÃO	INP	VPE/MBE	JFET	1PD+1R+3D+6FET	1,35(GHz)	1988
NEC	JAPÃO	GAAS/INP	MBE	MESFET	1PD+1R+5D+4FET	1,2	1987
FUJITSU	JAPÃO	INP	MBE	HEMT	1PD+1HEMT	2,0	1988
AT&T BELL LABS	EUA	INP		JFET	1PD+1R+4D+6FET	0,2	1988

TABELA III.2: Pesquisa empresarial em circuitos integrados optoeletrônicos.

FONTE: Shibata [26]

### III.3.4. Circuitos Integrados Ópticos

Os circuitos integrados ópticos são componentes que se destinam ao processamento de sinais luminosos. Para isto foram - e continuam sendo - desenvolvidos diversos tipos de dispositivos capazes de comutar feixes de luz, redirecioná-los, etc.. Estes dispositivos são arranjados numa superfície lisa utilizada como substrato onde são interconectados por guias de ondas luminosas. É como se fizesse um circuito integrado onde em vez de transistores de silício encontrás-

semos uma destas chaves ópticas e em vez de trilhas de metal encontrássemos guias de onda.

Segundo Senior [28] o nascimento da óptica integrada (que é o nome que se dá a esta área de pesquisa onde se busca a integração de dispositivos ópticos em componentes de pequenas dimensões) pode ser associado a algumas idéias básicas suscitadas por D.B. Anderson em 1965 num artigo chamado : "Optical and Electrooptical Information Processing", publicado pelo MIT (Massachussets Institute of Technology). Entretanto passaram-se alguns anos até que pesquisas comesçassem a ser desenvolvidas no Bell Labs por S.E. Miller em 1969. Outros artigos sobre óptica integrada foram publicados naquela época, como o de Goell e Standley em 1970 [29]. O desenvolvimento de tecnologia nesta área vem evoluindo de forma gradual e atualmente algumas funções lógicas mais simples, assim como algum processamento de sinais ópticos, têm sido implementadas fisicamente através destes dispositivos, a nível de protótipo.

Torna-se bem claro que a aplicação e desenvolvimento destes componentes está intimamente relacionada com o universo das comunicações ópticas. Entretanto, como veremos mais adiante, a evolução desta tecnologia tende a se dissociar dos sistemas de comunicações ópticas e fluir mais naturalmente para o processamento de informações através de novas arquiteturas computacionais, ou seja, para a construção de um computador óptico em vez da atual máquina eletrônica.

Mas qual a vantagem da utilização de tais circuitos, já que a tecnologia de silício continua em evolução constan-



te, assim como a dos circuitos eletrônicos em arseneto de gálio? Estas tecnologias estão em evolução, não há dúvida alguma, mas existem certas leis físicas que não podem ser negligenciadas e que, mais cedo ou mais tarde, acabarão impondo a opção pelo processamento de sinais luminosos. Elétrons sempre encontrarão dificuldades para a sua propagação num meio como o silício, GaAs ou em metais, quaisquer que sejam. Estão sujeitos a capacitâncias, resistências e indutâncias, que limitam fortemente a velocidade de qualquer circuito integrado eletrônico. A velocidade de resposta com a qual se pode transferir um sinal elétrico de um dispositivo para outro através de uma trilha de material condutor, dentro de um circuito integrado eletrônico, é limitada pelo produto da resistência elétrica da trilha pela sua capacitância. Em frequências mais altas as indutâncias associadas a estas trilhas passam a degradar o sinal.

Os circuitos integrados eletrônicos tem um limite efetivo de velocidade de operação em cerca de  $10^{10}$  Hz (10 GHz) [28] devido às inevitáveis capacitâncias existentes nos transistores e nas trilhas de metal depositadas nas últimas camadas do "chip". Este tipo de limitação não existe quando passamos a utilizar luz pois ela é uma onda eletromagnética de frequência muito mais alta, entre  $10^{14}$  Hz (100 THz) e  $10^{15}$  Hz (1000 THz) e ainda por cima não sofre efeitos de capacitâncias parasitas. Nestas frequências pode-se, "a priori", estimar velocidades  $10^4$  vezes mais altas do que qualquer circuito eletrônico imaginável. A luz, dentro de materiais como semicondutores ou dielétricos transparentes, como

uma fibra óptica, alcançam velocidades de comutação entre  $10^{-12}$  (pico) e  $10^{-15}$  (femto) segundos [28]. Comutações nesta velocidade, da ordem de sub-picosegundos, são inimagináveis em circuitos eletrônicos.

Outra vantagem da utilização de fótons em vez de elétrons é a de que elétrons, como são partículas com carga elétrica diferente de zero, interagem uns com os outros e por isto, num circuito eletrônico, dois ou mais sinais diferentes tem que, obrigatoriamente, ser conduzidos por trilhas diferentes. Com fótons isto não é necessário pois fótons não interagem entre si. São partículas neutras. Assim pode-se utilizar um só guia de onda para conduzir diversos sinais luminosos de diferentes frequências ou "cores", sem inteferência mútua. Este tipo de característica de transmissão é extremamente importante na medida em que abre caminhos para a transmissão e processamento de um volume de informações enorme, muito maior do que qualquer coisa baseada na eletrônica. Pode-se implementar arquiteturas computacionais paralelas com muito maior facilidade assim como transmitir diversos tipos de sinais num só guia óptico. Abre-se, portanto, uma série de possibilidades de novos produtos que venham a utilizar este paralelismo proporcionado pela luz como, por exemplo, novas estações de comutação de dados em telecomunicações e novos tipos de computadores. Conforme a demanda por maiores taxas de transmissão de dados for aumentando a utilização de circuitos ópticos será mais atraente que a de circuitos eletrônicos, desde que sejam resolvidos os diversos "trade-offs" existentes entre a densidade de integração

destes circuitos ópticos e seus custos de processamento, escala de produção, etc..

Façamos agora uma "dissecação" do que seria um circuito integrado óptico.

### III.3.4.1 - Elementos e Dispositivos de um Circuito Fotônico

Num circuito integrado óptico os sinais luminosos precisam de "caminhos" transparentes por onde possam se propagar de forma controlada e precisa, assim como os sinais eletrônicos de um circuito integrado usual precisam das trilhas de metal. Estes "caminhos" são chamados de guias de onda ópticos. Estes guias de onda não são como as fibras ópticas, que têm seção circular, mas sim formato retangular, conforme mostrado na figura III.26. Note-se que para sua implementação são necessárias três camadas de materiais com índices de refração diferentes. A camada do centro é a destinada a servir de guia para a luz, enquanto que as outras duas camadas tem que ter, necessariamente, índices de refração menores que o da camada central para garantir o confinamento da luz. A camada superior pode ser o próprio ar, que tem índice de refração  $n_0=1$ , suficientemente baixo, enquanto que o substrato pode ser feito de materiais semicondutores.

No exemplo dado acima, a luz é, grosso modo, restrita apenas pelas camadas superior e inferior, ou seja, a luz tem uma limitação unidimensional pois pode se espalhar para todos os lados a não ser numa direção. Para confinar ainda mais o feixe de luz adiciona-se mais uma limitação, ilustrada pela figura III.27. Vemos que agora existe uma limitação bidimensional, impedindo o espalhamento da luz dentro do guia óptico e, principalmente, dando meios de direcionarmos

a propagação do feixe de luz ao longo da superfície do substrato. Existem diversas maneiras de se fabricar este tipo de guia óptico, seja através de etching (figura III.27.a), difusão (figura III.27.b) ou deposição (figura III.27.c).

O processamento dos sinais ópticos pode ser feito através de diversos tipos de dispositivos. O desenvolvimento destes dispositivos permite uma analogia com a invenção do transistor décadas atrás. Estes dispositivos ópticos cumprem funções parecidas com a dos dispositivos eletrônicos, principalmente no que se refere a chaveamento e modulação de sinais ópticos.

Para que se consiga controlar este chaveamento é preciso que o material constituinte do dispositivo seja "influenciável" por estímulos externos que garantam o controle sobre o processamento da luz contida nos guias de onda. Estes estímulos externos podem ser sinais acústicos, elétricos, magnéticos e ópticos através dos chamados efeitos acústico-óptico, eletro-óptico, magneto-óptico e do fenômeno de biestabilidade óptica [32][33].

O efeito eletro-óptico presente em alguns materiais faz com que o índice de refração destes materiais seja alterado segundo a tensão e/ou corrente elétrica a que estão submetidos. A mudança do índice de refração de uma material influi na velocidade com que a luz se propaga neste mesmo material.

Um destes dispositivos está na figura III.28. É uma chave em forma de "Y", controlada por tensão, onde o sinal

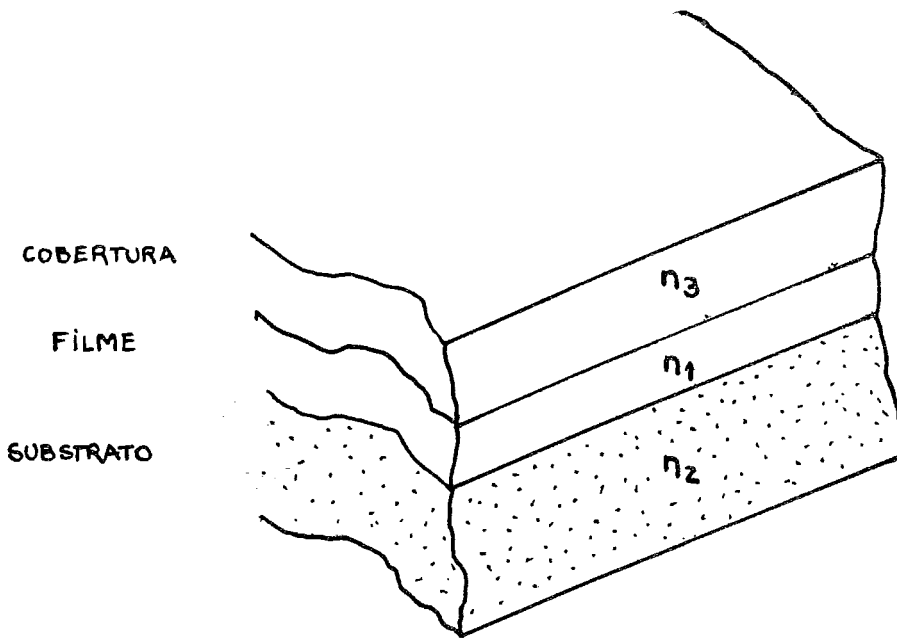


FIGURA III.26. Camadas em um guia de onda luminosa ( $n$ = índice de refração) [27].

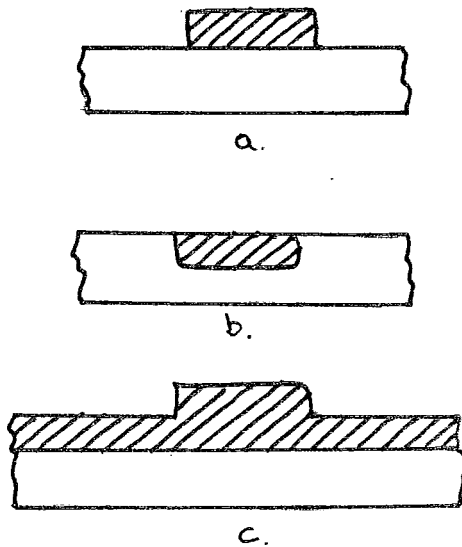


FIGURA III.27. Tipos de guias de onda [27].  
 a. por "etching"  
 b. por difusão  
 c. por deposição

óptico presente na entrada "E" pode ser desviado para um dos dois "braços" do "Y" segundo as tensões aplicadas nos eletrodos de metal. Os guias de onda neste dispositivo podem ser originados por difusão num substrato de arseneto de gálio ou niobato de lítio.[28]

Uma outra chave óptica está na figura III.29 Neste dispositivo a luz que passa em um guia de onda passa progressivamente para o outro guia de onda, dependendo da distância existente entre os guias e também do índice de refração do material. A aplicação de uma corrente de polarização através dos eletrodos dispostos sobre a estrutura, conforme ilustrado, faz com que o sinal de um guia de onda possa ser total e rapidamente transferido para o outro guia. A aplicação deste dispositivo como direcionador de sinais luminosos é muito clara e espera-se que seja bastante utilizado em sistemas maiores, com várias destas chaves ligadas em paralelo ou sequencialmente. Arranjando-se, por exemplo, um circuito com uma matriz destes elementos podemos gerar toda espécie de funções da lógica binária através de estruturas de multiplexação [30].

Outra possibilidade é a utilização do interferômetro de Mach Zehnder, conforme mostrado na figura III.30. O princípio de operação deste dispositivo baseia-se na alteração do índice de refração do material com que é feito o guia de ondas através da aplicação de tensões nos eletrodos. Com a modificação dos índices de refração nos guias de onda pode-se alterar a velocidade da luz que os percorre. Resultado: a

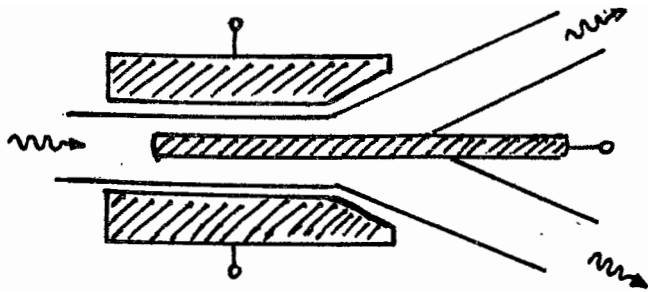


FIGURA III.28. Chave óptica em "Y" [27]

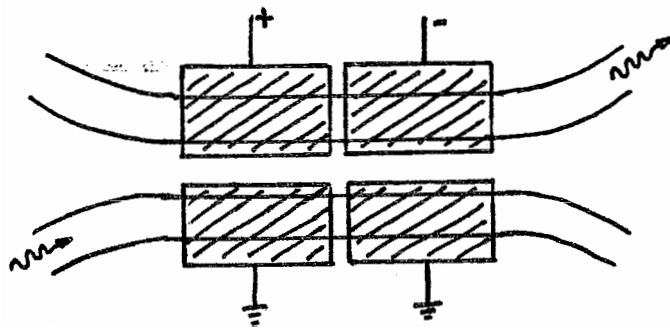


FIGURA III.29. Comutador óptico [27]

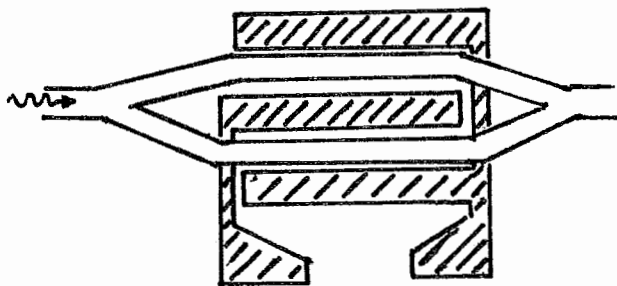


FIGURA III.30. Interferômetro de Mach-Zender [27]



fase da luz na saída de um dos guias de onda pode ser diferente da fase da luz que vem do outro guia. O somatório destes dois sinais fora de fase acaba por gerar um sinal luminoso de intensidade diferente do que entrou no dispositivo. Assim, pode-se modular a luz que passa pelo componente através das tensões aplicadas nos eletrodos. Este interferômetro/modulador pode operar a frequências muito altas, da ordem de um gigahertz ou mais, ou seja, é possível fazer o chaveamento de um feixe de luz em menos de um bilionésimo de segundo [28][34].

A escolha dos materiais a serem utilizados para a construção de um circuito com os dispositivos comentados acima está relacionada a facilidade de transmissão de sinais luminosos no comprimento de onda em que se quer trabalhar e à capacidade de utilização de efeitos eletro-ópticos, magneto-ópticos e/ou acústico-ópticos. Materiais com propriedades eletro-ópticas exibem comportamento não-linear na propagação de luz em seu interior dependendo das tensões e correntes elétricas a eles aplicadas. De forma similar, os materiais com propriedades magneto-ópticas e acústico-ópticas exibem comportamentos não lineares para a propagação de luz em seu interior conforme sejam expostos a campos magnéticos ou ondas acústicas e vibrações, respectivamente.

Diversos materiais tem sido pesquisados há algum tempo [29][32], sendo que o niobato de lítio ( $\text{LiNbO}_3$ ) parece ser o que tem tido maior aceitação pela sua baixa atenuação de comprimentos de onda na faixa do espectro visível e do in-

fravermelho próximo, além de características eletro-ópticas bem definidas [28]. Isto significa que utilizando-se o niobato de lítio torna-se possível controlar facilmente, através de eletrodos, os índices de refração dos guias de onda, conforme explicado nos parágrafos anteriores. Existem ainda outros materiais capazes de conduzir ou processar sinais luminosos tais como o tantalato de lítio, o pentóxido de nióbio e pentóxido de tântalo. [28]

Estes materiais, entretanto, não se prestam à fabricação de fontes luminosas do tipo laser ou LED, porque são incapazes de gerar luz, obviamente fundamental num circuito integrado que se propõe a processar luz... Esta deficiência gera o problema de não se conseguir conjugar fontes luminosas e processadores ópticos num substrato feito de apenas um material como, por exemplo, o niobato de lítio, que não gera fótons. É necessário que se empregue outro material capaz de emitir luz, como o arseneto de gálio, o arseneto de gálio alumínio, o fosfeto arseneto gálio, etc., e o resultado acaba sendo a utilização de dois tipos de materiais como substrato num só circuito integrado óptico. Tem-se então um circuito integrado óptico híbrido, porque feito com dois substratos diferentes. Evidentemente o fato de termos dois substratos de materiais diferentes complica o processamento químico do componente, tornando a sua fabricação mais custosa.

Uma outra possibilidade na feitura de um circuito integrado óptico é o emprego de materiais que sejam capazes de gerar luz e que tenham algum efeito eletro-óptico, mesmo que

pouco acentuado. O objetivo é conjugar dispositivos que sejam capazes de gerar e detectar fótons (como lasers e fotodetectores, por exemplo) com outros capazes de chavear e/ou alterar os sinais luminosos num substrato de um só material, simplificando os processos de fabricação. Existem citações na literatura que dão conta do emprego de GaAs e GaAsAl neste tipo de circuito integrado óptico, embora as características eletro-ópticas destes materiais sejam mais modestas que as do niobato de lítio ( $\text{LiNbO}_3$ )[28].

#### III.3.4.2 - Biestabilidade Óptica

O fenômeno da biestabilidade óptica tem sido considerado um dos mais importantes fatores de interesse nas pesquisas dedicadas à construção de um circuito fotônico. Vários artigos trabalhos tratam deste tema [28][34][35][36]. O princípio de operação dos dispositivos biestáveis é o da histerese encontrada em cavidades Fabry-Perot [35]), nome dado em homenagem aos físicos franceses que o inventaram em 1896. Trata-se de um dispositivo com dois espelhos planos, paralelos entre si, com um material transparente aos comprimentos de onda utilizados. Cada espelho reflete parte da luz incidente, deixando passar a outra parte. A luz que penetra na cavidade entre os dois espelhos é refletida por eles de forma sucessiva. Como a luz tem um caráter ondulatório, os feixes de luz, sucessivamente refletidos, interagem entre si, construtiva ou destrutivamente.

Se as cristas e vales desse feixes coincidirem, ocorre

uma interferência construtiva, e os feixes no interior da cavidade entrarão em ressonância. Neste caso a intensidade da luz no interior do dispositivo aumenta bastante, chegando a ser várias vezes mais forte que a luz incidente. A intensidade do feixe transmitido é quase igual à do incidente.

Se as cristas e vales no interior da cavidade não coincidirem ocorre uma interferência destrutiva, razão pela qual o feixe transmitido tem intensidade muito baixa.

A interferência construtiva ocorre quando a distância entre os espelhos é igual a um múltiplo da metade do comprimento de onda da luz [34]. Caso isto não aconteça os feixes tendem a se anular. Como ao penetrar na cavidade a radiação mantém inalterada a sua frequência mas não o seu comprimento de onda, podemos dizer que, para induzirmos uma interferência construtiva podemos, por exemplo, alterar o comprimento de onda da radiação de modo que este se enquadre na condição descrita no início do parágrafo. A maneira de alterar o comprimento de onda da radiação é mudar o índice de refração da cavidade. Como sabemos, cada material tem o seu índice de refração, que é o fator pelo qual é reduzida a velocidade de propagação da luz no vácuo (300.000 km/s) em relação à velocidade da luz no material. Poderíamos fazer isto trocando o material do interior da cavidade ou mudando o índice de refração do próprio material. O índice de refração não é uma qualidade invariável dos materiais e, assim, pode ser alterado sob determinadas condições. No caso da cavidade Fabry-Perrot, é possível variar o índice de refração do ma-

terial variando a intensidade do feixe incidente (segundo Araújo [34] este é um efeito associado à chamada susceptibilidade não linear de terceira ordem), e então pode-se chavear o dispositivo (passar de interferência construtiva para destrutiva e vice-versa) através do controle do feixe incidente.

Descobriu-se, entretanto, que, uma vez induzida a ressonância através do aumento da intensidade do feixe incidente, a sua posterior diminuição ao valor de chaveamento não acarretava o retorno do feixe transmitido ao seu estado original. Este comportamento de histerese é típico dos dispositivos ópticos biestáveis. Para cada valor de intensidade do feixe incidente existem dois valores estáveis do feixe transmitido e o chaveamento do dispositivo depende do caminho a ser seguido na sua curva de histerese, ou seja, do estado anterior ao chaveamento.[35][34][36]

Desta histerese, provocada pelo comportamento não linear do índice de refração de alguns materiais empregados em cavidades Fabry-Perrot, partiu-se para pesquisa e construção de alguns protótipos de utilização em comutação óptica e memorização de sinais ópticos.

O principal dispositivo baseado nestes princípios é o chamado "self electrooptical-effect device" (dispositivo de efeito eletro-óptico auto-realimentado) ou simplesmente SEED (numa lembrança do termo inglês "seed", semente). O SEED foi desenvolvido nos Laboratórios Bell [30]. A sua estrutura é, em termos gerais, a mesma de um fotodetector PIN, tendo sua

região intrínseca uma super-estrutura de camadas muito finas, com menos de 100 angstroms de espessura, de materiais como GaAs e AlGaAs. Esta estrutura é construída alternando-se diferentes tipos de semicondutores através da deposição de filmes finos, cada um com espessura aproximada de 10 nanômetros. Cada uma das camadas de GaAs (arseneto de gálio) é chamada de poço quântico porque as camadas vizinhas, feitas de AlGaAs (arseneto alumínio gálio), têm uma banda proibida maior, provocando o confinamento dos elétrons nas camadas de GaAs, fenômeno explicado pela Mecânica Quântica. Conforme ilustrado na figura III-32, esta estrutura de multi-camadas está conectada em cada um de seus lados a uma camada de AlGaAs de cerca de 1 micrômetro de espessura. Os semicondutores utilizados são o arseneto de gálio e o arseneto de alumínio gálio ou telureto de mercúrio e telureto de cádmio ou silício e fosfeto de índio. A dupla de materiais mais utilizadas para o fabrico destes dispositivos é o arseneto de gálio e o arseneto de alumínio gálio.

O dispositivo SEED é ativado pela luz mas necessita de um campo elétrico para funcionar conforme o esperado. A absorção da luz pelo dispositivo provoca a alteração do campo elétrico ao longo da superestrutura do SEED. A alteração do campo elétrico provoca a alteração da voltagem nos terminais do dispositivo que, por sua vez, altera suas características de absorção de luz. Na medida em que a incidência de luz em um SEED provoca uma alteração na voltagem de seus terminais este dispositivo pode ser considerado um fotodetector. Mas,

além disto, a fotocorrente gerada pela incidência de luz é utilizada como "feedback" positivo para influenciar a operação do próprio dispositivo [36]. Quando a fotocorrente aumenta diminui a voltagem de polarização, provocando por sua vez o aumento da capacidade de absorção luminosa do SEED [28][22]. Eventualmente atinge-se um ponto onde a potência da luz incidente provoca o aumento da absorção e então o SEED diminui a intensidade da luz transmitida. Na figura III.32 vemos a estrutura de um SEED, assim como um gráfico onde está expressa a histerese e a biestabilidade.

Após o desenvolvimento do SEED veio o S-SEED ("symmetric self eletro-optic-effect device"), que vem a ser nada mais nada menos que dois diodos de poço quântico conectados em série. Ao contrário do SEED convencional, este dispositivo é relativamente insensível a flutuação na radiação incidente e ao nível de polarização aplicado. Ele pode funcionar tanto como um amplificador quanto como um elemento de memória, utilizando-se suas características de biestabilidade.

Na figura III.33 temos um desenho simplificado de um S-SEED. Digamos que o dispositivo tem um comprimento de onda nominal, ou seja, sua operação se dá neste comprimento de onda. Sem tensões aplicadas, a absorção se dá num comprimento de onda, na região intrínseca do fotodiodo. Quando se aplica um campo elétrico a absorção, antes localizada num determinado comprimento é deslocada para uma faixa de comprimentos de onda maiores. Conseqüentemente o dispositivo passa a transmitir, em vez de absorver, o comprimento de on-

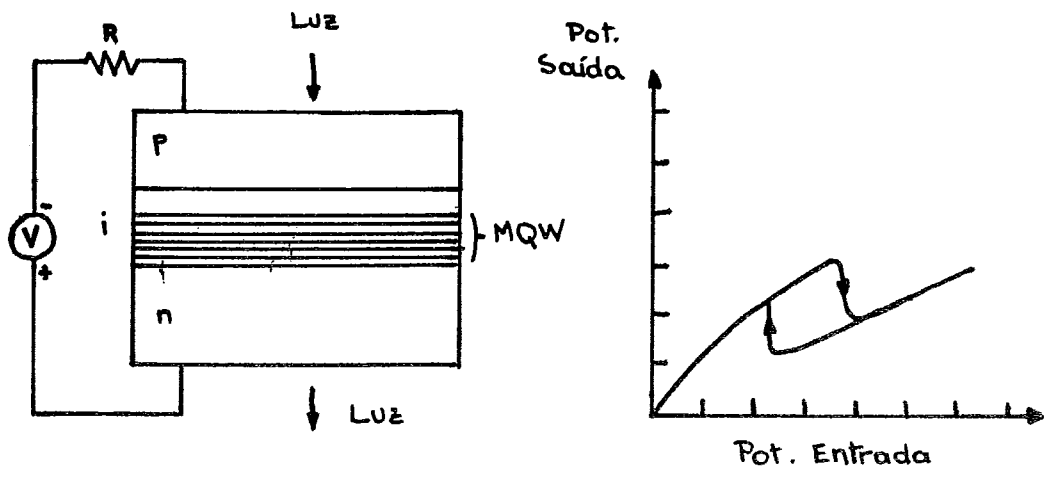


FIGURA III.32. Esquema básico de um SEED e gráfico de histerese/biestabilidade [22].



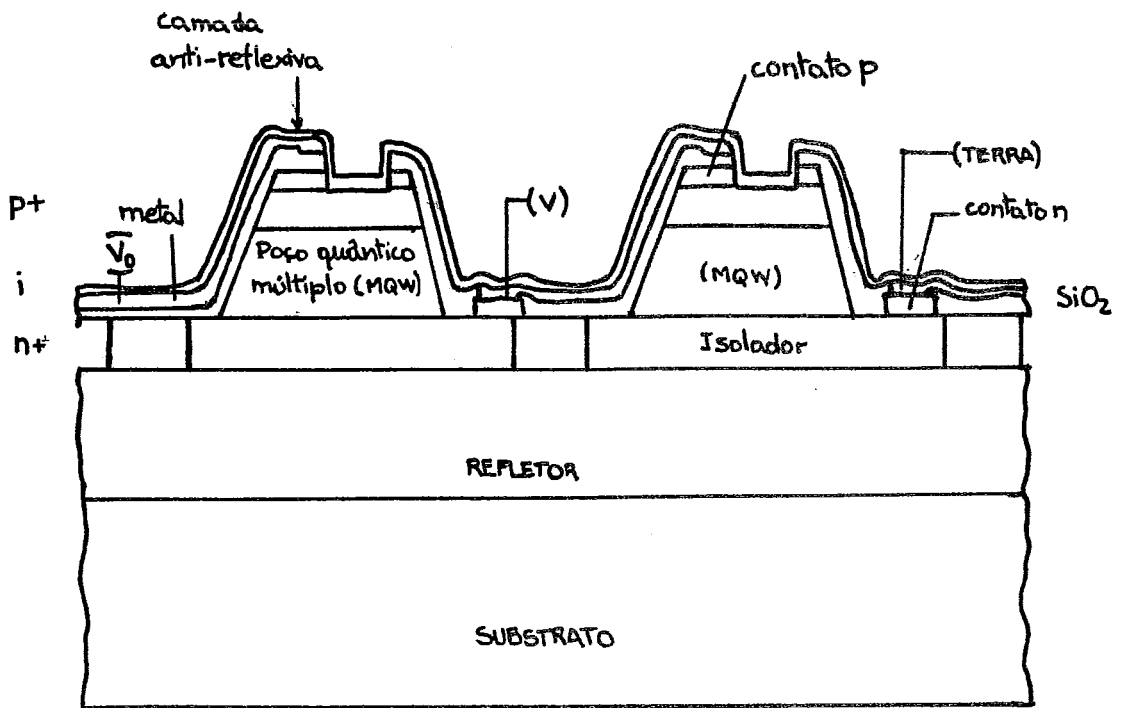


FIGURA III.33. S-SEED [22].

da original.

A operação se dá através da aplicação de uma tensão DC de polarização, que chamaremos aqui de  $V_0$ . O contato central, V, é controlado por tensões intermediárias entre  $V_0$  e terra (GND). Quando V e  $V_0$  são iguais, o diodo "a" da figura, submetido a uma tensão  $V - GND$ , vai para o estado de transmissão, enquanto o outro continua absorvendo. Já quando V é igual a GND, o diodo "b" transmite, enquanto o outro absorve. Neste caso utilizamos o controle através de tensões elétricas.

O controle do dispositivo pode se dar também através da incidência de luz nos fotodiodos. Neste caso, o terminal V "flutua", sem estar conectado a nenhum outro dispositivo externo. O S-SEED é colocado no estado em que se quer, fazendo-se incidir, simultaneamente, feixes de luz com intensidades diferentes em cada um dos fotodiodos. Neste caso, uma proporção de 2:1 entre as intensidades dos feixes é o suficiente para haver o chaveamento. O fotodiodo que recebe o feixe mais intenso é colocado no estado de absorção.

Depois disso, o dispositivo é lido através de dois feixes de luz de igual intensidade. Um feixe é absorvido e o outro é transmitido. Uma característica importante do S-SEED é que o dispositivo pode ser controlado por feixes de baixa intensidade e lido por feixes de alta intensidade. Como a saída é mais intensa que o sinal de controle, pode-se dizer que o S-SEED tem ganho. A saída de um S-SEED pode alimentar vários outros conectados em cascata, ou seja, em sequência.

### III.3.5. Fibras Ópticas

As fibras ópticas são guias de onda de seção circular feitos de material dielétrico e que podem propagar luz. Estas fibras geralmente têm um núcleo central circundado por uma camada de material também dielétrico com um índice de refração ligeiramente menor (cerca de 1% menor). Geralmente estas camadas (o núcleo central e seu revestimento) são feitas de sílica ( $\text{SiO}_2$  - óxido de silício) e o índice de refração destas camadas é alterado através da adição de substâncias químicas, chamadas dopantes, durante o processo de fabricação ( $\text{GeO}_2$  - óxido de germânio - é um dopante comumente utilizado). Além destas camadas, que formam o canal propagador dos raios luminosos, existe ainda uma outra camada de revestimento, geralmente feita de um polímero como o acrilato, para proteger as camadas luminosas da interferência de outras fibras (o que poderia causar um fenômeno chamado de "crosstalk", quando a luz de uma fibra interfere com a luz de outra), além de reduzir a formação de pequenas deformações chamadas de "microbendings" originárias de pressões transversais sofridas pela fibra ou na falta de uniformidade na fabricação do cabo óptico. Estas pequenas deformações podem causar degradação do sinal luminoso que passa pela fibra.

Mas apenas estas camadas não são suficientes para proporcionar proteção contra ambientes hostis e para aumentar a resistência mecânica do conjunto. Por isto se colocam mais

camadas protetoras em volta. A fibra então é colocada num cabo com várias camadas de material de maior resistência mecânica, como uma folha de polietileno com fibras de aço ou KEVLAR.

O núcleo central da fibra sempre teve ter um índice de refração maior que a camada que o envolve. Desta forma, segundo as leis ópticas elementares, como a lei de Snell, a luz ficará confinada em seu interior se as condições de angulação dos raios luminosos assim o permitirem, garantindo quase total reflexão interna. A geometria da fibra e sua composição química determinam o conjunto de ondas eletromagnéticas que podem efetivamente se propagar em seu interior. Estas ondas são chamadas de modos das fibras.

Existem dois grande conjuntos de classificação dos modos: os modos radiantes e os modos guiados. Nos modos radiantes a energia luminosa que passa no interior da fibra sai do seu núcleo e acaba se dissipando rapidamente. Nos modos guiados a energia luminosa permanece no interior do núcleo, podendo transmitir informações e potência. Neste caso podem haver diversos modos no interior de uma fibra, sendo que cada modo tem uma velocidade de propagação própria.

Quando lançamos sinais luminosos em um fibra óptica vários destes modos são excitados de diversas maneiras, uns mais, outros menos, dependendo da maneira com que a luz é introduzida na fibra: diâmetro do feixe luminoso, ângulo de entrada em relação ao plano perpendicular à direção de propagação, alinhamento entre fonte luminosa e fibra, etc.. A

distribuição da energia luminosa entre os diversos modos evolui na distância percorrida pelo feixe ao longo da fibra na medida em que a energia luminosa pode passar de um modo para outro. Um exemplo deste fenômeno é a passagem da energia luminosa de um modo guiado para o modo radiante devido a reflexões espúrias causadas por rugosidades ("microbendings") ou torção mecânica. Evidentemente este tipo de interferência acaba por atenuar o sinal luminoso do interior da fibra, já que provoca a perda de raios de luz para o seu exterior (figura III.34). Em alguns casos estes efeitos podem ser utilizados para o fabrico de sensores de pressão feitos de fibra, como veremos no capítulo sobre aplicações.

Antes de discriminarmos os principais tipos de fibras existentes vejamos algumas características típicas deste meio de propagação de sinais luminosos.

A banda passante de uma fibra determina a maior taxa de transferência de dados que ela pode suportar sem prejuízos inaceitáveis na resolução do sinal[37]. O que limita a banda passante de uma fibra são diversos tipos de degradação ou dissipação a que o sinal luminoso está sujeito em seu interior. As principais causas desta limitação de desempenho são a atenuação e as distorções causadas pelas dispersões intramodal e intermodal.

A atenuação é definida como sendo a razão entre a potência óptica de saída ( $P_{out}$ ) e a potência óptica de entrada ( $P_{in}$ ) para um determinado comprimento de fibra percorrido ( $L$ ), segundo a expressão:

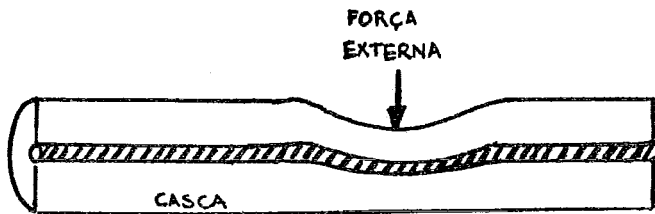
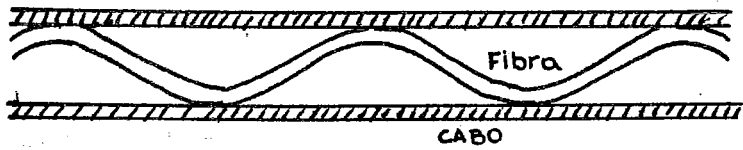


FIGURA III.34. Microdeformações ("microbendings").

$$P_{in}/P_{out}$$

$$\text{Atenuação} = 10 \log \text{-----}$$

$$L$$

Uma fibra ideal, sem perdas, deveria ter  $P_{in} = P_{out}$ , correspondendo a uma atenuação de 0 dB. A atenuação normalmente é expressa em decibéis por quilômetro.

A atenuação existe porque a potência da luz que se propaga ao longo da fibra vai diminuindo exponencialmente devido a efeitos de absorção e dispersão. Este é o mais importante fator de desempenho numa fibra óptica, pois a atenuação pode influenciar toda instalação de um sistema de telecomunicações: fibras com nível de atenuação muito alto para uma determinada distância de transmissão exigirão a presença de estações repetidoras para restaurar a forma original do sinal. Quanto menor a atenuação das fibras mais afastadas entre si poderão estar as estações repetidoras e, portanto, menos repetidoras serão empregadas, proporcionando menor gasto de recursos em equipamentos.

O sinal luminoso, conforme vai se propagando pela fibra, fica cada vez mais distorcido devido a dispersão intramodal ou cromática [21] e intermodal, que provocam o alargamento dos pulsos de luz. Este alargamento dos pulsos acaba por limitar a banda passante do sistema de comunicação porque pulsos de frequência mais alta, mais próximos entre si, acabam por se confundirem uns com os outros. Desta forma es-

tas dispersões são os principais fatores limitantes na capacidade de transmissão dos sistemas de comunicações ópticas [20][21][24][41].

A dispersão intramodal acontece no âmbito de um só modo, e é causada basicamente, pela dispersão material ou cromática e dispersão do guia de onda. Nem toda a energia lançada numa extremidade de uma fibra óptica alcança o outro lado depois de um mesmo intervalo de tempo. A dispersão intramodal é uma função direta do comprimento de onda e, conforme a fonte luminosa tenha maior largura espectral, ou seja, emita em muitas frequências diferentes, maior será a distorção do sinal [21].

A dispersão material é consequência da variação do índice de refração do material da fibra segundo a frequência, fazendo com que os vários componentes do espectro da fonte luminosa viagem a velocidades diferentes. Geralmente a dispersão material aproxima-se de zero em comprimentos de onda em torno de 1,3 micrômetros, dependendo dos dopantes utilizados na fabricação da fibra.

A dispersão intermodal é o maior motivo de degradação dos sinais ópticos em uma fibra quando mais de um modo é excitado. Esta dispersão é causada pelo atraso sofrido por alguns raios de luz que percorrem um caminho maior do que outros dentro do núcleo. Isto acontece principalmente em fibras onde o núcleo tem um diâmetro grande, da ordem de 50 a 1.000 micrômetros, chamadas de fibras multimodo (mais adiante detalharemos os tipos de fibras existentes). Como o nú-



cleo é muito largo, os raios de luz sofrem diversos tipos de reflexões internas, sendo que alguns percorrem um caminho maior e outros não (figura III.35) [20][21].

As fibras podem ser classificadas segundo suas características de refratividade e pelas dimensões de seu núcleo.

Fibras Multimodo de índice Degrau têm um núcleo de diâmetro entre 50 e 1.000 micrômetros com um índice de refração constante. São fibras geralmente baratas e também coletam luz com maior eficiência graças ao seu núcleo de grande diâmetro. Tendo um núcleo maior fica mais fácil alinhar corretamente uma fonte luminosa na ponta de uma fibra deste tipo, razão pela qual se consegue lançar uma quantidade razoável de energia luminosa em seu interior. Entretanto este tipo de fibra não consegue transmitir sinais a longas distâncias devido à sua alta dispersão modal, que acaba por estreitar a sua banda passante. Por isto seu uso é inaceitável para telecomunicações de longa distância e de altas taxas de transmissão de dados.

Fibras Multimodo de índice Gradual têm um núcleo de diâmetro entre 50 e 1.000 micrômetros com um índice de refração decrescente na direção radial e sentido externo. Assim como as fibras multimodo degrau, este tipo de fibra também é fácil para se trabalhar e tem muito menor dispersão modal. Por isto sua banda passante é maior e sua atenuação também, razão pela qual ela é bastante utilizada em telecomunicações.

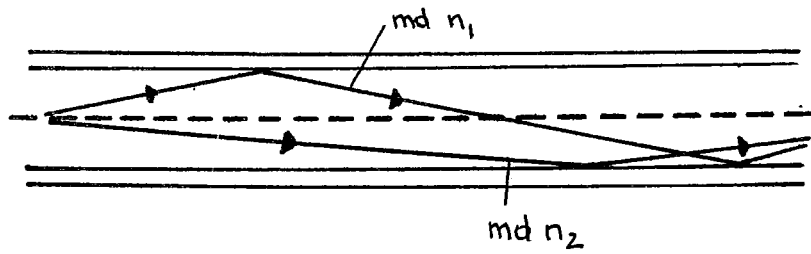


FIGURA III.35. Modos de propagação em uma fibra óptica.

Fibras Monomodo têm um núcleo com índice de refração constante, assim com as fibras Multimodo índice Degrau, mas de tamanho muito pequeno. Desta forma elas conduzem apenas um modo ao longo de seu comprimento. Como o núcleo tem um diâmetro muito pequeno é extremamente difícil alinhar uma fonte luminosa à ponta de uma fibra deste tipo. O acoplamento entre fibras deste tipo requer equipamento especial, assim como uma série de procedimentos para assegurar uma perda mínima do sinal luminoso na passagem de uma fibra para outra. Em que pese estas dificuldades operacionais, este tipo de fibra tem baixa atenuação e excelente banda passante, razão pela qual seu uso é recomendado em telecomunicações de longa distância.

Existem algumas regras para se projetar os sistemas de comunicação óptica levando-se em conta estes limitantes, ou seja, atenuação e dispersões diversas.

A primeira delas é a atenuação. Fibras ópticas geralmente têm baixa atenuação nos comprimentos de onda de 1,3 e 1,5 micrômetros. Portanto estes são, deste ponto de vista, os melhores comprimentos de onda a serem utilizados nas fontes de luz, lasers ou LED's. Entretanto baixa atenuação não é tudo. Precisamos também de baixas taxas de dispersão inter e intramodal.

No caso da dispersão intermodal podemos utilizar fibras monomodo, onde apenas um modo pode ser transmitido, ou então fibras multimodo gradual, onde os raios de luz de maior ângulo de reflexão interna, que percorrem um caminho

maior e que, "a priori", levariam mais tempo para viajar, percorrem regiões com índices de refração menores que os do centro da fibra e nos quais a luz tem maior velocidade de propagação. Assim, os dois efeitos se compensam, em parte.

Minorados os efeitos da dispersão intermodal, temos ainda que enfrentar os efeitos da dispersão intramodal, que existe mesmo em fibras monomodo. A dispersão intramodal, e suas componentes, a dispersão material ou cromática e a dispersão de guia de ondas, são função do comprimento de onda utilizado, e tem valor zero (comumente chamado de "lambda zero") em torno de 1,3 micrômetros, como vemos na figura III.36. Como já foi exposto em item sobre lasers semicondutores, os lasers de segunda geração, que emitem em torno de 1,3 micrômetros, aproveitam esta "janela" onde os efeitos de atenuação e dispersão são mínimos (figura III.37).

No caso dos sistemas de terceira geração, que utilizam comprimentos de onda na faixa de 1,55 micrômetros, o problema não está na atenuação mas sim na dispersão cromática ou material, cujo valor é diferente de zero.

Uma das soluções para este problema é a utilização de fontes que realmente só emitam em uma única frequência, ou seja, que sejam extremamente precisas em relação ao comprimento de onda emitido. Uma fonte de luz deste tipo é o laser de realimentação distribuída (DFL) de 1,55 micrômetros.

Outra maneira de se lidar com este problema envolve o uso de fibras dopadas com elementos como germânio ou fósforo. Estas fibras tem uma característica de dispersão cromá-

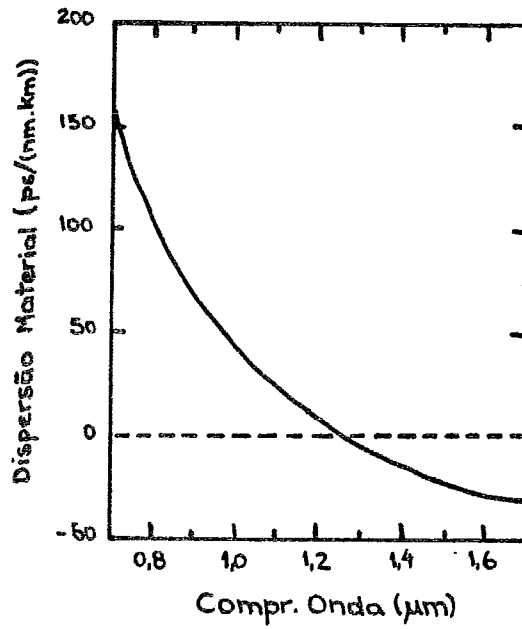
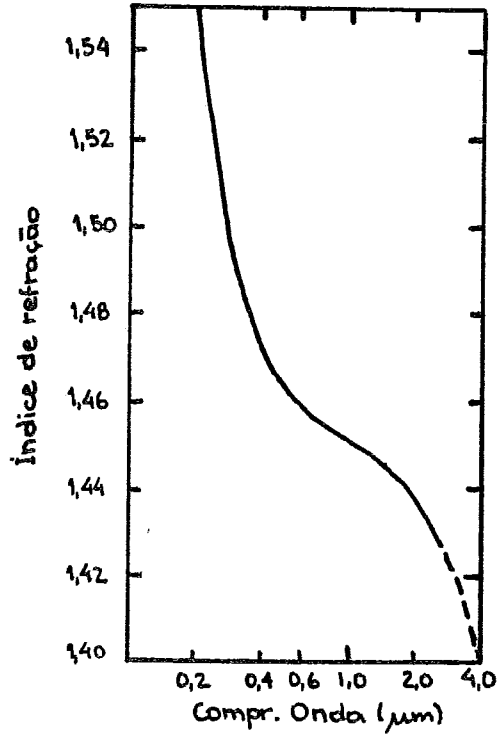


FIGURA III.36. Índice de Refração e Dispersão Cromática de uma fibra óptica [21].

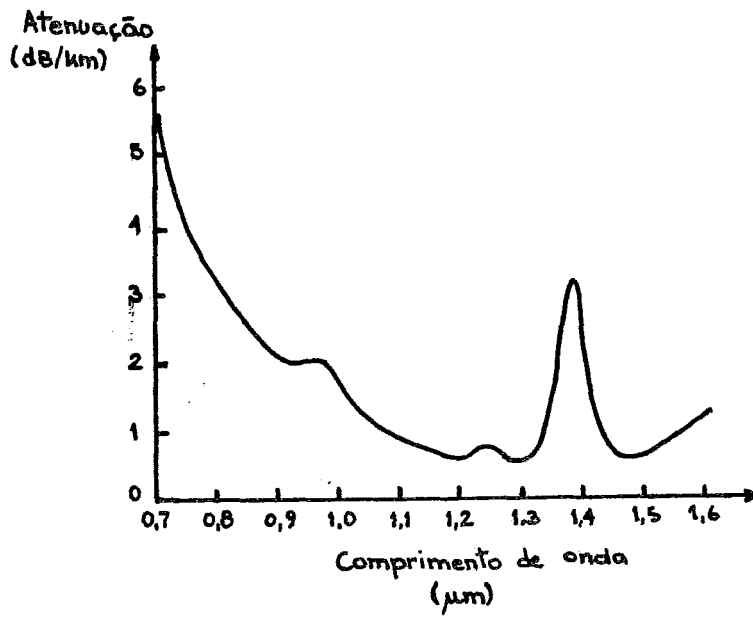


FIGURA III.37. Atenuação Típica de uma Fibra Óptica. [21].

tica diferente da fibra normal pois o ponto de dispersão material zero encontra-se deslocado de 1,3 para 1,5 micrômetros, aproximadamente, e são denominadas fibras de dispersão deslocada.

Outro fator importante para o desempenho de uma fibra é a sua abertura numérica. A abertura numérica de uma fibra é definida como sendo o seno do maior ângulo com que se pode incidir um raio luminoso para que este tenha uma reflexão total dentro do núcleo. Se por acaso for introduzido um raio de luz num ângulo maior que o aquele determinado pela abertura numérica da fibra ele estará fadado a cair num modo radiante, ou seja, será dissipado ao longo do caminho a ser percorrido.

## CAPÍTULO IV - APLICAÇÕES DA OPTOELETRÔNICA E FOTÔNICA

Neste capítulo aborda-se o universo de aplicações dos dispositivos optoeletrônicos e fotônicos. A análise será feita tendo sempre em vista os conceitos de paradigma, trajetória e evolução tecnológicas.

Deve-se ressaltar que a evolução tecnológica dos diversos setores de atividade relacionados neste capítulo está intimamente associada à evolução de tecnologias que não as de dispositivos optoeletrônicos e fotônicos e que estão num processo de transição de uma trajetória tecnológica para outra. Analisaremos estes aspectos ao longo do capítulo.

### IV.1 - Setor de Telecomunicações

O setor de telecomunicações foi o principal provocador do desenvolvimento da optoeletrônica. O desenvolvimento das comunicações tem se dado numa taxa muito alta e espera-se que num futuro próximo os recursos de comunicações englobem atividades como a utilização de receptores de TV e/ou conjuntos de áudio e vídeo como terminais de redes de comunicação, transmitindo informações de toda espécie, desde medicina e educação até transmissão de informativos (provavelmente baseados em hipertexto), fotografias etc..

Este tipo de serviço demandará maior capacidade dos meios de comunicação pois o volume de informações a ser transmitido será muito maior do que o atual, que engloba basicamente voz numa estreita faixa do espectro audível. Está claro, portanto que o desenvolvimento de novos sistemas de



comunicação tem embutido como objetivo principal o aumento da capacidade dos sistemas através da utilização de ondas portadoras eletromagnéticas de frequência mais alta, como luz, por exemplo.

Os elementos básicos de um sistema de comunicações ópticas estão ilustrados na figura IV.1. Todos os sistemas devem seguir, essencialmente, a forma descrita na ilustração. Num sistema simples devemos ter pelo menos um transmissor, onde está colocada a fonte de luz (laser ou LED), conectado ao cabo óptico, onde está a fibra óptica. O cabo óptico conecta o transmissor ao receptor, onde se encontra um fotodetector.

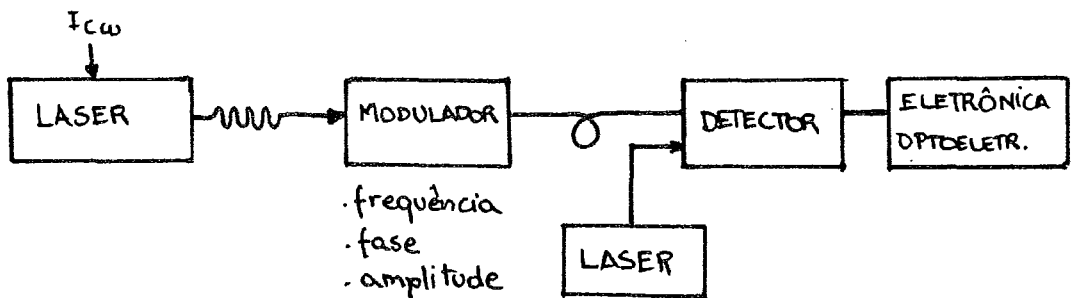
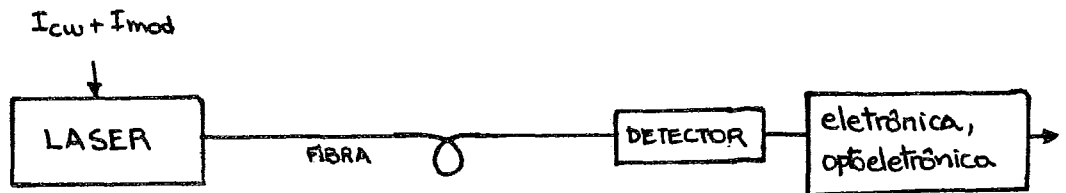
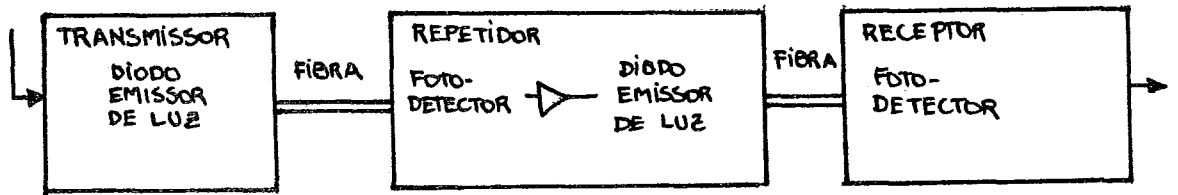
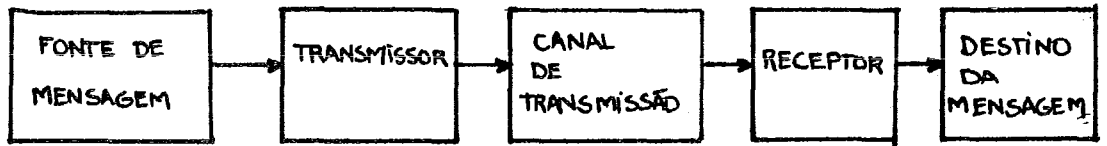


FIGURA IV.1. Elementos básicos de um sistema de comunicações ópticas.

Os sistemas descritos na página anterior são esquemas básicos de sistemas de comunicações ópticas. Na prática, devemos levar em conta outro fator: a degradação do sinal, que leva à colocação de estações repetidoras para restaurar as informações. Conforme já foi exposto anteriormente, as fibras ópticas degradam o sinal através da atenuação da sua amplitude e pelo alargamento dos pulsos.

Para contornar estes problemas instalam-se estações repetidoras. Este tipo de estação consiste basicamente num receptor acoplado a um transmissor. O receptor converte os pulsos de luz em sinais eletrônicos, que são amplificados e restaurados e então os envia para o transmissor, que converte os sinais elétricos em luz novamente. [21][20][24]

#### IV.1.1 - Breve Histórico

Levando-se em conta um dos sentidos da palavra óptica (maneira de ver, julgar), poderíamos falar que as comunicações ópticas existem desde que determinados grupos de pessoas conseguiram codificar uma mensagem em sinais visuais com o objetivo de fazer com que outra pessoa ou grupo de pessoas conseguisse receber estes sinais e decodificá-los. Assim foi com os sinais de fumaça dos índios, com os faróis da antiguidade que indicavam a rota a ser seguida pelas galeras, pela reflexão da luz do Sol em um espelho ou uma peça polida similar, etc.. A idéia de se transmitir luz através de um guia de onda ou de uma fibra de vidro teve seu primeiro experimento, provavelmente, na Alemanha em torno de 1930

[20]. Entretanto o primeiro protótipo de uma fibra óptica como hoje a conhecemos (um núcleo de vidro recoberto por outra camada de vidro) foi desenvolvido na Inglaterra em 1958 [20]. As perdas de transmissão eram tão grandes que a fibra óptica foi praticamente abandonada como meio de transmissão.

Procurava-se um meio de transmissão que conseguisse ser confiável e com poucas perdas. As pesquisas avançaram em outros tipos de meios de transmissão, como o guia de lentes, desenvolvido no final da década de 50, início da de 60, em que uma série de lentes levemente convergentes, colocadas periodicamente dentro de um tubo ou suporte, tinham como função manter um pequeno fecho de luz focando-o de tempos em tempos e protegendo-o de influências externas. Este sistema, entretanto, tinha seus pontos fracos. Como é um sistema eminentemente mecânico, ele está sujeito a vibrações de toda espécie, que pode desalinhar as lentes e arruinar a transmissão. Além disto o meio gasoso dentro do tubo pode sofrer os efeitos devidos à diferença de temperatura externa, e à diferença de temperatura existente entre a parte de cima e a parte de baixo da cavidade interna do tubo que contém as lentes pode gerar um efeito prismático onde a luz é desviada. Desta forma seria necessário isolar termicamente o tubo, tornando o conjunto mais volumoso, ou simplesmente retirar o ar de seu interior e mantê-lo desta forma, o que, considerando-se as enormes extensões exigidas de um meio de transmissão de sinais, seria absurdo e proibitivo, devido à in-

conveniência dos frequentes vazamentos que certamente ocorreriam.

A idéia de se utilizar diversas lentes numa linha de transmissão também originou, no período de 1964-65, o surgimento da proposta do guia de lentes de gás, onde o papel de lentes seria efetuado por concentrações de gás distribuídas de tal forma que o sinal óptico seria "orientado" a seguir o caminho do guia. A principal causa do abandono deste sistema foi o volume considerável de energia a ser empregada para obter, num grande volume de gás, as características de refração recomendadas.

O primeiro laser de estado sólido a funcionar a contento foi o laser de rubi, em 1960 [28]. Em 1961 funcionou o laser a gás de hélio/neônio e em 1962 funcionou o primeiro laser semiconductor de arseneto de gálio [28]. O laser colocou à disposição uma fonte de luz coerente e essencialmente monocromática, de frequência de operação 10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> vezes maior do que as utilizadas na época, em torno de 10<sup>10</sup> [20]. Inicialmente pensava-se que o emprego de equipamentos operando em frequências ópticas aumentaria a capacidade dos sistemas cerca de 10.000 vezes. No entanto, antes que se encontrasse uso prático, uma série de problemas teriam que ser resolvidos: redução do tamanho dos lasers, aumento de sua confiabilidade, mantendo alta qualidade do sinal de saída, assim como seu controle. Além disto não existiam dispositivos capazes de fazer modulação e demodulação em alta velocidade e, mais importante ainda, não existia uma forma de se transmi-

tir sinais luminosos com baixa perda na transmissão, flexível, barata e de larga banda passante.

Em torno de 1966 as fibras ópticas já eram consideradas um meio de transmissão promissor mas as suas perdas eram tão altas que seu uso em larga escala era impossível. Em 1970 as perdas das fibras já eram bem menores e conseguia-se utilizar o laser semiconductor em temperatura ambiente de forma contínua. Foi a partir da utilização de lasers semicondutores, cada vez mais confiáveis, e de fibras ópticas com perdas cada vez menores, que os sistemas de comunicação óptica tornaram-se realmente uma opção viável frente aos sistemas puramente eletro-eletrônicos.

As aplicações inicialmente propostas para sistemas de telecomunicações ópticas baseavam-se em ligações ponta-a-ponto, projetadas para velocidades de 2 a 50 Mbits/s [21]. Os componentes optoeletrônicos utilizados neste tipo de sistema operam em comprimentos de onda de 810 a 890 nm, onde a atenuação nominal de uma fibra de qualidade normal varia entre 4 a 6 dB/km, proporcionando um espaçamento entre repetidores de 5 a 10 km, dependendo do número de emendas sofrido pela fibra. Estes são os chamados sistemas de primeira geração. Os sistemas de segunda geração operam em comprimentos de onda de aproximadamente 1,3  $\mu$ m, onde as perdas de transmissão da fibra óptica estão, em média, próximas a 1 dB/km, aumentando ainda mais o espaçamento entre repetidores. Os sistemas de terceira geração estenderam ainda mais o limite para a transmissão de sinais ópticos com pouca atenuação e

pouca distorção.

#### IV.1.2 - Vantagens e Aplicações

As principais vantagens da comunicação por fibras ópticas são [20]:

- baixa perda ao longo de uma larga faixa de frequências (menos de 1 dB/km, correspondendo a uma perda de 25% ao longo de 1 quilômetro);
- larga faixa de frequências de operação (1 e 100 GHz, respectivamente, para fibras multimodo e mono-modo em 1 km);
- flexibilidade mecânica;
- pequenas dimensões (a fibra de vidro em si tem um diâmetro de aproximadamente 100 micrometros e, se incluirmos as coberturas de plástico, 1 a 2 mm);
- pequeno peso;
- não sofre interferências eletromagnéticas;
- baixo "crosstalk" e alta segurança;
- abundância de matéria prima (sílica, o principal constituinte da fibra óptica, é o material mais abundante na crosta terrestre);
- alta resistência a ataques químicos e variações de temperatura;

Apesar de todas estas vantagens está claro que as pesquisas para o aprimoramento da fibra óptica estão evoluindo no sentido de se obter cada vez menos perdas e cada vez menores limitações à utilização de sinais de frequências mais altas.

Os principais requisitos exigidos de uma fonte óptica para um sistema de comunicações ópticas são:

- deve operar numa faixa comprimentos de onda nos quais as fibras têm baixa dispersão e baixa perda;

- confiabilidade, o que significa longa vida útil, boa estabilidade de operação, fidelidade entre o sinal de entrada e o sinal de saída.

- boa potência de saída, adequada às necessidades do sistema;

- alta eficiência, o que implica em baixa dissipação da calor e alta sensibilidade a sinais de entrada;

- coerência espacial, ou seja, facilidade de focalização para a entrada de uma fibra, permitindo melhor acoplamento;

- facilidade de modulação direta ou indireta;

- pequeno tamanho;

- pouco peso;

- pequeno custo.

Por sua vez, um bom fotodetector deve ter:

- operação na frequência compatível com o sinal de entrada;

- boa sensibilidade;

- confiabilidade;

- velocidade, o que implica em respostas rápidas na saída em relação aos sinais de entrada;

- bom acoplamento com a fibra;

- pequeno tamanho;



- pouco peso;
- pequeno custo.

Sistemas de comunicação por fibras ópticas podem, atualmente, atingir taxas de transmissão de até 1,6 gigabits por segundo, atingível com a utilização de componentes de baixa atenuação e distorção.

Alem de aplicações em telecomunicações, sistemas de transmissão por fibra óptica também podem ser utilizados no setor elétrico. Neste caso, o sistema é utilizado para transmitir informações para a proteção e monitoramento de sistemas, sua supervisão e controle, elementos fundamentais nos atuais sistemas de geração e transmissão de energia elétrica, cada vez maiores e complexos [21][39]. Geralmente este tipo de informação é transmitida através de sistemas de micro-ondas. Entretanto as interferências advindas de uma rede de alta voltagem numa grande cidade degradam os sinais de um sistema de comunicações por micro-ondas, tornando-o pouco confiável. Além disto, a arquitetura de uma grande cidade, como diversos tipos de construções bloqueando ou atenuando o sinal, é um problema a ser considerado de forma séria quando da instalação de um sistema de micro-ondas. Assim, a transmissão por fibras ópticas configura excelente opção neste setor industrial.

Outra grande aplicação dos sistemas de comunicações ópticas é a ligação direta do assinante ("subscriber loop") através de fibras ópticas. [21][40]

Conforme o preço dos cabos ópticos caiam em relação ao

preço dos cabos de cobre tradicionais, torna-se natural e desejável que as fibras venham até o nível do assinante. Na realidade, o mercado volta-se naturalmente para isto, na medida em que este tipo de inovação tem um efeito multiplicador nada desprezível. A substituição dos cabos de cobre por fibras ópticas aumenta tremendamente a capacidade de transmissão dos sistemas e portanto, a capacidade do assinante acessar os mais diversos serviços, muito mais sofisticados que a mera transmissão de sinais de voz ou modems de baixa capacidade. Estes serviços englobariam, além das funções tradicionais de transmissão de voz, funções como recepção de sinais de vídeo e de dados, configurando definitivamente a chamada rede digital de serviços integrados a nível doméstico.

A evolução do setor de comunicações ópticas tem indicado uma tendência crescente para a pesquisa e desenvolvimento de sistemas de comunicações ópticas coerentes, ou seja, sistemas que levem em conta a informação de fase do sinal, ao contrário dos sistemas de comunicações ópticas atuais, que utilizam como parâmetros de recepção apenas a intensidade do sinal óptico. Tal desenvolvimento elevaria significativamente a sensibilidade dos sistemas de detecção em até 20 dB's, além da possibilidade de implementação do esquema de multiplexação por divisão de frequência (FDM - "frequency-division multiplexing") com ajuste muito preciso de frequência. [41]

O desenvolvimento deste tipo de sistema não quer dizer

que o sistema tradicional, baseado na modulação direta da intensidade da luz deixe de existir. Muito pelo contrário, espera-se que sistemas de comunicações ópticas coerentes sempre sejam mais caros que os sistemas de modulação de intensidade[41].

#### IV.2 - Setor de Computação

As maiores possibilidades de evolução tecnológica da optoeletrônica encontram-se atualmente no desenvolvimento de computadores ópticos. Neste tipo de sistema o processamento se dará através de uma série de dispositivos optoeletrônicos e fotônicos, alguns dos quais apresentados no capítulo anterior. A seguir explicitaremos as diversas configurações que utilizem dispositivos ópticos e de como são feitas determinadas operações lógicas em alguns destes sistemas.

Quando falamos sobre computação óptica devemos ter em mente que existem pesquisas em diversos níveis de utilização da óptica em computadores. Nem todo "computador com óptica" é um "computador óptico". Já existem sistemas computacionais que utilizam tecnologias ópticas de uma forma ou de outra como, por exemplo, redes locais com interconexões através de fibras ópticas e periféricos como discos ópticos. Existem outras utilizações de sinais ópticos em computadores que, apesar de existirem apenas em pesquisas e protótipos, estão num nível de desenvolvimento que permite supor que encontrarão utilização certa na indústria, como a interconexão óptica entre módulos e/ou placas de um computador. Entretanto o

ápice da utilização da fotônica está na implementação de funções lógicas e processos de tratamento computacional de informações, ou seja, a implementação de processadores ópticos.

#### IV.2.1 - Breve Histórico

A idéia da computação através de sinais luminosos remonta ao início do anos 60, e sempre esteve intimamente ligada ao desenvolvimento do laser. Na medida em que os lasers semicondutores se tornaram uma realidade, a possibilidade de integração de dispositivos ópticos numa pastilha de um material apropriado tornou-se um objetivo factível e mesmo desejado, na medida em que, apesar da constante evolução dos circuitos eletrônicos, é esperado que as tecnologias baseadas no processamento de elétrons atinjam os limites impostos pelas leis da física (vide Capítulo III).

Na década de 60 pesquisadores em diversas empresas e institutos, principalmente na IBM [36], exploraram as possibilidades de efetuar computação através de fótons, ao invés de elétrons. As dificuldades encontradas, e que não conseguiram ser transpostas, relacionavam-se principalmente ao estágio da tecnologia de materiais e à impossibilidade de implementação física satisfatória dos dispositivos idealizados [36].

Pesquisas realizadas num centro de pesquisa da IBM empregavam lasers de estado sólido para a construção de portas lógicas [36]. Uma das propostas utilizava dois lasers que,

dispostos de uma determinada forma, interferiam entre si, ligando-se ou desligando-se mutuamente, originando um comportamento biestável. Após analisarem o arranjo lógico a ser implementado e o estado da arte em materiais não-lineares à época, os pesquisadores concluíram que o experimento seria mal sucedido devido à alta dissipação térmica prevista, impossibilidade de construção de um dispositivo óptico de três terminais como o transistor clássico, dentre outros problemas [36].

Depois de alguns anos de tentativas e discussões, a idéia de construir dispositivos de chaveamento óptico para a construção de um computador foi sendo posta de lado, tanto pelo pessimismo reinante nos pesquisadores em relação à efetiva implementação de tais componentes, principalmente nos laboratórios da IBM, como também pela constante evolução das tecnologias microeletrônicas, como o advento dos circuitos integrados [36].

A coisa mudou na década de 70, quando nos Laboratórios BELL, da AT&T, se inventou um diodo laser que operava a temperatura ambiente. A partir daí toda uma série de aplicações podiam ser divisadas, dentre elas a desacreditada idéia de se construir computadores ópticos. A evolução das tecnologias de processamento, devida à evolução da microeletrônica, assim como a constatação de que os computadores digitais estão alcançando certos limites físicos [42], como já exposto, levou ao desenvolvimento de dispositivos não-lineares à base de poços quânticos múltiplos (que requisitam sofisticadas

tecnologias de crescimento de cristais) e dispositivos que antes só operariam corretamente com refrigeração, como o próprio laser semiconductor.

Os investimentos em torno da computação óptica têm se dado principalmente na AT&T, onde realmente houve uma opção decidida em torno da pesquisa e desenvolvimento de dispositivos ópticos [43][44], com diversos sucessos como a invenção do SEED e a implementação efetiva de um processador óptico que realiza funções lógicas, mas a velocidades que aparentemente estão limitadas aos instrumentos de medição disponíveis [17][31]. A IBM, ao contrário, desde os experimentos mal sucedidos da década de 60 fez uma opção decidida pelo desenvolvimento dentro do universo eletrônico [36] considerando pouco provável a implementação de computadores ópticos. É provável que os experimentos da AT&T tenham provado o contrário, mas o "gap" de P&D existente na IBM deve impedi-la, a priori, de alcançar os resultados obtidos pela outra empresa.

#### IV.2.2 - Lógica Através da óptica

A implementação de funções computacionais através de dispositivos ópticos vem sendo pesquisada das mais diversas formas. A análise das arquiteturas computacionais atuais, baseadas em dispositivos eletrônicos, é um dos principais pontos de partida. A "recriação" do computador através da óptica, como sugerem alguns, parte do pressuposto de que as formas tradicionais de computação estão sendo repensadas em

função de um novo tipo de implementação, além de que estas novas "formas" e arquiteturas podem se prestar a aplicações radicalmente diferentes do que atualmente se espera de um computador. Evidentemente a questão sobre a função mais apropriada das máquinas ópticas não está completamente definida pois espera-se, de um lado, melhorar o desempenho computacional através das maiores velocidades possibilitadas pela utilização de sinais luminosos e, por outro lado, implementar novas funções de processamento em áreas como reconhecimento de padrões, processamento de imagens, etc..[42][36]

Devemos ter em mente que a penetração das tecnologias ópticas na área de computação está se dando de forma multifacetada, onde diversas tecnologias, implementações, algoritmos e arquiteturas são propostas, divididas basicamente em dois grandes grupos: uma trajetória de caráter evolucionário, onde as funções computacionais eletrônicas tradicionais são melhoradas através da utilização de luz em alguma parte do processamento, mantendo-se, entretanto, o caráter "determinístico" das arquiteturas atuais, e outra trajetória mais revolucionária, onde existe uma perspectiva de implementação de novas arquiteturas computacionais, radicalmente diferentes das tradicionais, como redes neuronais, "cellular automata" etc. utilizando-se para tanto a capacidade de propagação, na velocidade da luz, dos sistemas ópticos, dispositivos optoeletrônicos e fenômenos ópticos não-lineares [42][91][92][92][102][103][104][105][106][107].

#### IV.2.3 - Níveis de Conexão Óptica

Podem ser identificados diversos níveis hierárquicos para a utilização de tecnologias ópticas em computadores [45][36]. O primeiro e mais alto nível seria o da comunicação entre máquinas, ou seja, interconexões entre computadores, como a implementação de redes locais através de fibras ópticas. Este nível inclui conexões como a de uma rede padrão Ethernet, por exemplo, sendo que o cabo elétrico coaxial tradicional, capaz de suportar taxas de transmissão de dados da ordem de 10 milhões de bits por segundo, será substituído por um cabo óptico, provavelmente no padrão FDDI ("Fiber Distributed Data Interface" ou Interface de Dados Distribuída por Fibra), com taxas de transmissão de dados na faixa de 100 milhões de bits por segundo.

O segundo nível nesta escala hierárquica seria o da comunicação óptica dentro da máquina, entre sub-sistemas ou módulos como processadores, memórias, periféricos, etc.. Um exemplo de implementação de um sistema neste nível seria o DIALOG.H, um protótipo de computador de quinta geração construído no Laboratório de Eletrotécnica do MITI, em Tsukuba, Japão, no qual o barramento de dados ("bus") entre os processadores foi implementado ópticamente. O protótipo era constituído de diversos módulos, cada um com seu processador e sua memória local, arrançados de forma semi-circular em torno de uma superfície espelhada também semi-circular. Em cada módulo existia um diodo laser, encarregado de emitir



siniais, e um fotodiodo avalanche, com o papel de receber as informações de emitidas pelos outros módulos. O principal ponto de interesse desta implementação é o fato dos sinais serem transmitidos entre os módulos através do ar e não de fibras ópticas. Sempre que um módulo transmite uma informação, esta cruza o ar até a superfície espelhada, que então se encarrega de refleti-la para todos os módulos, indiferentemente, onde será recebida pelos foto-diodos.[17][36]

Um terceiro nível hierárquico de implementação de tecnologias ópticas é a comunicação entre terminais traseiros ("backplane"), ou seja, terminais localizados na parte de trás de um computador que suporte várias placas de circuito impresso. Este tipo de abordagem, ideal para computadores de grande porte que tenham muitas conexões a serem feitas entre seus terminais traseiros, foi utilizada em computadores ESS-5 da AT&T, construídos e instalados pela empresa e responsáveis pela comutação de linhas telefônicas de longa distância [36]. Estes computadores empregam feixes de fibras ópticas para interconexão entre seus terminais, com capacidade de direcionamento de 100 milhões de linhas.

No quarto nível hierárquico as conexões são feitas entre placas de circuito impresso. Neste caso a procura-se atingir taxas de transmissão de dados entre 1 e 10 gigabits por segundo.

Descendo cada vez mais nesta escala hierárquica, chegamos ao quinto nível, onde as conexões são feitas entre circuitos de uma mesma placa. Neste caso procura-se instalar

guias de onda ópticos em substituição às tradicionais trilhas de metal dos circuitos impressos. Como já foi exposto em outro capítulo desta dissertação a crescente escala de integração dos circuitos eletrônicos acarreta necessariamente o aumento de sua densidade funcional. Este aumento de densidade implica, por outro lado, no aumento da quantidade de sinais a serem recebidos e enviados de um circuito com larga escala de integração, com o aumento de terminais, "pad's" e trilhas de conexão nos circuitos impressos. A utilização de interconexão óptica a este nível proporcionaria a substituição desta estrutura eletrônica de comunicação em cada circuito integrado por uma estrutura de maior ou igual capacidade e de muito maior simplicidade, já que por esquemas de multiplexação ou modulação em frequência poder-se-ia colocar vários sinais num só guia de ondas.

Finalmente o último nível a ser visualizado é aquele em que as conexões ópticas são feitas entre portas lógicas ou blocos funcionais num circuito integrado. Atualmente as conexões num "chip" são feitas através de trilhas de metal, geralmente alumínio, e poli-silício (silício policristalino). A utilização de diversos níveis de conexão num circuito integrado (por exemplo, dois níveis de metal e um de poli-silício, ou dois níveis de metal e dois de poli-silício) demonstra que os requisitos de interconexão entre os elementos de um circuito eletrônico são realmente consideráveis, a começar pela capacitância e resistividade inerente às trilhas de metal. Dependendo do tamanho da trilha a ser imple-

mentada, assim como da frequência do sinal que vai ser transmitido por esta trilha, o seu projeto pode demandar atenções e cálculos comparáveis aos de uma linha de transmissão. Assim, são procurados meios de se reduzir ao máximo o tamanho das trilhas de metal assim como evitar ao máximo que elas passem por regiões onde exista concentração de cargas (o que aumenta a capacitância associada à trilha e portanto diminui a velocidade do circuito). Além disto o emprego de diversos níveis de conexão se prende à condição básica de que trilhas de sinais diferentes não devem se cruzar. É sobre este aspecto básico que se deve discutir o emprego de guias de onda ópticos em substituição às trilhas de metal pois, como já foi discutido, a interferência entre dois sinais luminosos que se cruzam é ínfima, possibilitando mais liberdade na distribuição de sinais num circuito integrado. Outro aspecto importante a ser abordado quando se fala sobre a utilização da optoeletrônica no sexto nível hierárquico é que o desempenho dos circuitos eletrônicos é bastante afetado pela latência associada às conexões elétricas dentro de um "chip". Como toda trilha de metal tem um tempo de atraso, proporcional à sua resistência e capacitância, o projeto de um circuito integrado tem que levar em conta estes atrasos ou "delays", de modo que a velocidade máxima de todo o circuito seja igual à velocidade permitida pelo seu módulo ou região mais lenta. Para explicarmos melhor tomemos um exemplo: imagine-se um "grande circuito integrado em alta escala, com centenas de milhares de componentes em diferentes

blocos funcionais. Para o circuito operar da forma desejada todo ele deve ter como referência um sinal de sincronismo, comumente chamado de "clock". É a partir do "clock" que todas as operações têm uma referência de tempo e, sem esta referência, o circuito não pode funcionar de maneira correta. Logo, o sinal de "clock" deve estar em toda parte do circuito onde ele é necessário e ao mesmo tempo não podem existir diferenças de tempo entre a chegada do sinal de "clock" num bloco "A" em relação à sua chegada num outro bloco "B". Pois bem, o problema é que existem diversos caminhos, de diferentes tamanhos e características, pelos quais o sinal de sincronismo tem que passar. Assim, para chegar ao bloco "A" o sinal pode levar um tempo "T1" enquanto que para chegar no bloco "B" este tempo pode ser muito maior, digamos "T1 + X". Assim, o bloco "B" só passará a funcionar a contento "X" unidades de tempo depois que o bloco "A". Isto configura um estado de latência pois, enquanto um bloco funciona, o outro não. Evidentemente isto não pode acontecer, pois o sinal de "clock" é um sinal de sincronismo e sincronismo pressupõe ações ocorrendo ao mesmo tempo. Para que as "ações" ocorram ao mesmo tempo nestas circunstâncias as únicas soluções possíveis são: otimizar o caminho do "clock" para o bloco "B" de modo que o sinal chegue ao mesmo tempo em que chega no bloco "A"; rebaixar a frequência do "clock" de modo que esta seja igual à velocidade que ele leva para chegar ao bloco "B"; ou adicionar elementos de atraso nos caminhos mais rápidos de modo que estes se tornem equivalentes ao caminho

mais lento. Assim todo o circuito operará a uma mesma velocidade, limitada pelo caminho de pior desempenho.

Na medida em que este problema existe pela própria natureza do comportamento dos elétrons, uma das soluções propostas para a eliminação ou redução destes problemas de latência é a utilização de sinais ópticos para distribuição do "clock". Uma abordagem para esta solução é a da figura IV.2, onde um sinal de "clock" óptico é gerado por um diodo laser e distribuído através de um holograma para diversos fotodetectores distribuídos na superfície do "chip", que convertem o sinal óptico em sinal elétrico para as regiões do circuito onde estão localizados. Elementos como hologramas e SLM's (moduladores espaciais de luz) serão descritos nos próximos itens.

#### IV.2.4 - Elementos Ativos e Passivos

Os dispositivos utilizados em processamento óptico podem ser classificados em dois grandes grupos: os ativos e os passivos. Dispositivos ópticos ativos seriam as fontes de luz, como lasers e led's, moduladores espaciais de luz (SLM's, "Spatial Light Modulators"), defletores, hologramas dinâmicos e detectores. Estes dispositivos ópticos ativos podem, por sua vez, ser divididos em elementos seriais e paralelos. Os dispositivos passivos seriam as lentes, espelhos, hologramas estáticos, fibras, etc..

Concentremo-nos em dois dos mais importantes elementos num sistema computacional óptico: os hologramas e os modula-

dores espaciais de luz.

#### IV.2.5. O Papel da Holografia

Hologramas não são utilizados apenas em exposições de arte ou cartões de crédito. Eles podem ser empregados em uma série de aplicações de processamento óptico pois um holograma pode interconectar elementos e servir de memória. Vejamos como.

##### IV.2.5.1 - Como Funciona

O termo holograma vem do grego 'hólos', servindo para designar a idéia de inteireza, completeza, seguido de 'grama' ou 'gramato', que representa a idéia de registro, escrito. Um holograma é o registro, num filme fotográfico ou superfície de material foto-sensível, das figuras de interferência resultantes da superposição das ondas de um feixe de radiação coerente, originário de um laser, com as ondas que foram refletidas por um objeto. O resultado prático é que se tem a representação tridimensional de um objeto graças à utilização de uma fonte de luz coerente como referência de fase, ou seja, sempre que quisermos reproduzir fielmente a imagem contida em um holograma devemos utilizar uma fonte de luz como referência aos padrões gravados no holograma. Desta forma podemos "recriar" em nossas retinas a espacialidade de um objeto ou de um conjunto de objetos. A figura IV.3 descreve de maneira simples como se dá a gravação e percepção de um holograma. A luz refletida pelo objeto forma um padrão

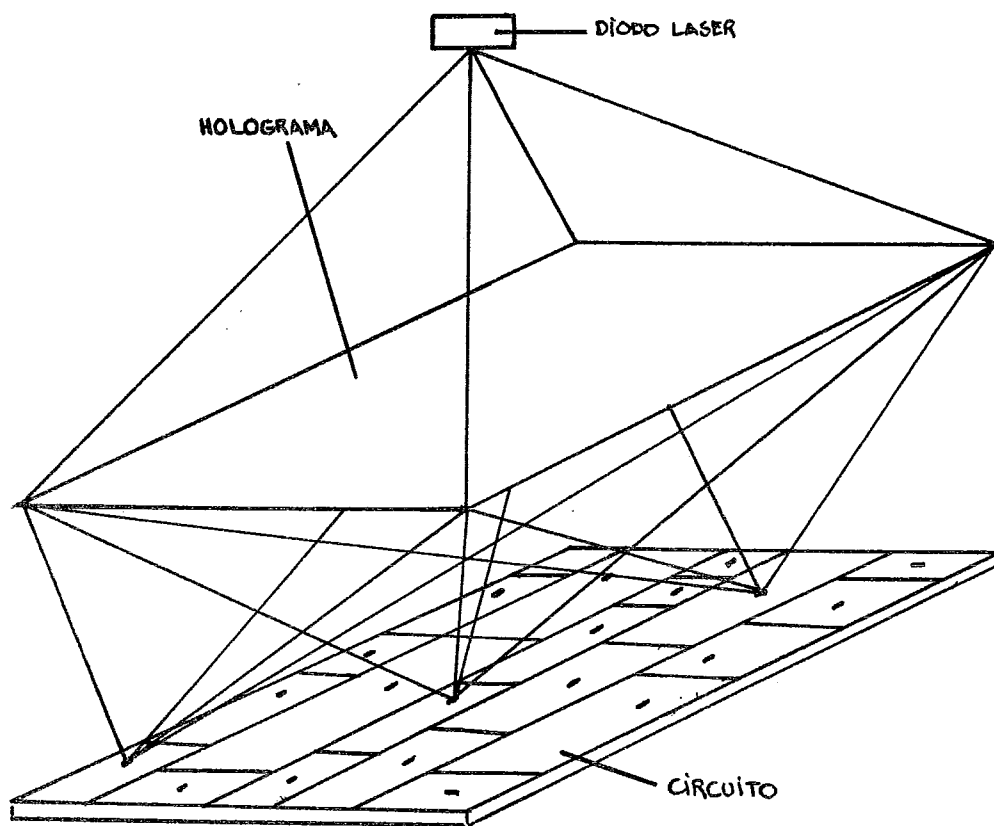


FIGURA IV.2. Distribuição de sinal de "clock" óptico através de holograma [17]

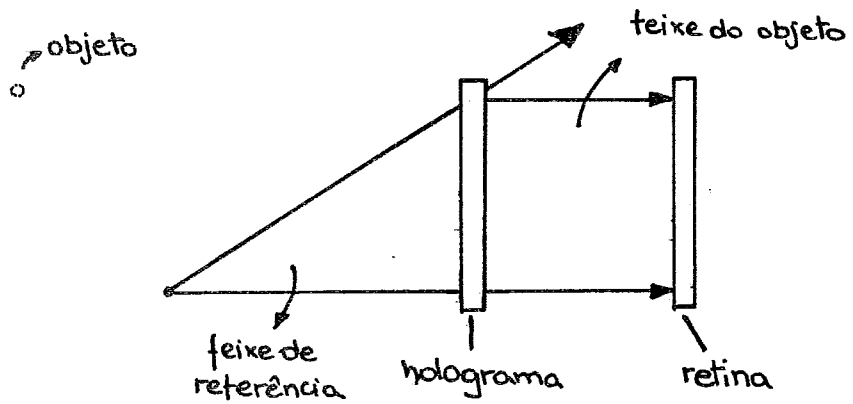
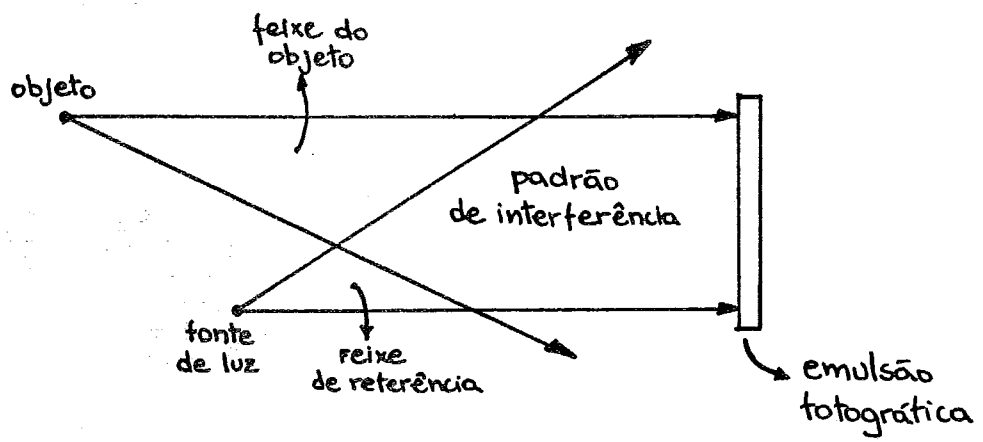


FIGURA IV.3. Gravação e percepção de um holograma.  
[17].



de interferência com a luz que vem do laser e este padrão de interferência é gravado um material fotosensível, como um filme fotográfico, por exemplo. Para reconstruir este padrão é necessário que tenhamos uma fonte de luz na mesma posição da original para que, atravessando o holograma, possamos reconstruir o padrão de interferência causado pelo objeto. O holograma "seleciona" do feixe de luz de referência o padrão luminoso do objeto armazenado. O olho humano intercepta este padrão e vê o objeto original através do holograma, numa imagem virtual.

#### IV.2.5.2 - O Que Se Pode Fazer Com Ele

Está claro que o holograma é um meio de armazenamento óptico de informações. Podemos reproduzir através de um holograma um grande número de informações gráficas que sejam utilizáveis em processamento óptico de sinais. Deve-se ter em mente que o uso do holograma em computação óptica está, muitas vezes, inserido dentro de um novo conceito de computação, como reconhecimento de padrões, processamento óptico de sinais gráficos, redes neuronais, etc.

Um holograma pode ser bidimensional ou tridimensional e armazena as informações em blocos chamados de "páginas".

Um holograma bidimensional é a chamada POHM ("page-oriented holographic memory"). Neste tipo de dispositivo as várias regiões de um holograma, as páginas, contendo cada uma aproximadamente  $10^4$  a  $10^6$  bits, podem ser acessadas através de um feixe de laser, segundo a figura IV.4. Como um

holograma pode ter um número de páginas que vai de  $10^4$  a  $10^6$ , a capacidade total de armazenamento de um POHM pode ser de até  $10^{12}$  bits, sendo que cada uma das páginas pode ser acessada através da deflexão do feixe de laser à região certa do holograma, projetando-se a informação num dispositivo plano encarregado de receber a informação [17].

Uma das aplicações mais discutidas é o holograma como memória associativa. Neste tipo de memória, o padrão armazenado num holograma pode ser totalmente restaurado através da iluminação deste holograma por um feixe de laser representando apenas parte do padrão armazenado. Este feixe de luz reproduz parcialmente o que está armazenado no holograma. Quando este padrão parcial ilumina o holograma na posição correta, o holograma reproduz o feixe de referência que criou a imagem. Através da reflexão deste feixe de referência de volta para a película do holograma a imagem pode ser totalmente reproduzida. Assim, o resultado é que, a partir de informações incompletas (parte de uma foto, por exemplo), pode-se extrair de um holograma a informação completa (a fotografia completa).

Um exemplo de holograma tridimensional é o PVHS ("photorefractive holographic storage")[47], onde as páginas estão organizadas numa estrutura tridimensional. Este dispositivo de armazenamento pode ser extremamente rápido (1 a 10 microsegundos de tempo médio de acesso), a tal ponto que a informação transferida de um disco rígido magnético, de excelente desempenho, em 5 horas, pode ser transferida por um

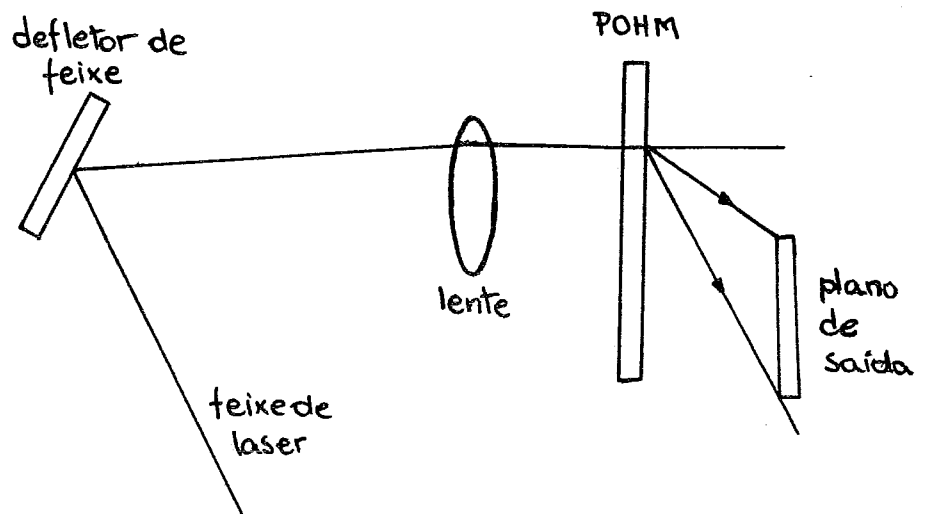


FIGURA IV.4. Esquema básico de um "POHM" [17].

destes dispositivos de armazenamento em 1 segundo.

#### IV.2.6 - O Papel dos SLM'S ("Spatial Light Modulators")

Este tipo de dispositivo tem sido considerado um dos mais importantes em termos de implementação de arquiteturas ópticas. Os moduladores espaciais de luz são componentes ou conjuntos de componentes que se encarregam de modificar o direcionamento dos raios luminosos ou simplesmente interromper sua propagação. Ele modula a quantidade de luz de saída em função de um sinal de entrada, seja luminoso ou eletrônico. Neste tipo de dispositivo o objeto de processamento é a informação luminosa formatada segundo a sua localização no espaço físico, ou seja, a intensidade da luz processada é tão importante quanto sua localização espacial.

Esta página de texto é um modulador espacial de luz. A luz refletida pelo preto da letra tem características diferentes da que é refletida pelo papel branco, ou seja, conforme corremos a vista através do papel a retina detecta diversas modulações sob a forma de "pretos" e "brancos". É verdade que este modulador espacial de luz não é de grande valia, pois "esta página que vos fala" é completamente estática, ou seja, todas as letras estão em determinado lugar no espaço da folha e assim continuarão enquanto este papel durar.

Mas em computação óptica o que interessa são SLMs que tenham configurações variáveis, ou seja, que expressem dife-

rentes dados através de sua característica de flexibilizar o fluxo de luz através de sua superfície. Os SLMs funcionam do seguinte modo: a partir de determinados sinais de controle o dispositivo determina que sinais luminosos poderão passar através dele e para onde estes sinais serão endereçados. Na medida em que este endereçamento pode ser provocado por luz ou sinais eletrônicos, existem dois tipos básicos de SLM's: os de endereçamento eletrônico e os de endereçamento óptico.

Nas tabelas IV.1 e IV.2 temos alguns tipos de SLM desenvolvidos na década de 80 [36].

-----  
DISPOSITIVOS DE ENDEREÇAMENTO ÓPTICO  
-----

NOME	Desenvolvi- mento	Material Modulador	Resolução (pares de linhas/mm <sup>2</sup> )	Sensibil. Óptica (microJ/cm <sup>2</sup> )
Válvula de Luz de Cristal Líquido	Hughes	Cristal líquido nemático	30	6
Modula- dor Micro- channel	MIT, Hama- matsu, Optron	Cristal Eletro- óptico	10	3x10 <sup>-6</sup>
Modulador Pockels	Itek, USC, Sumitomo	óxido de bismuto- silício ou óxido bismuto germânio	6	5
PRIZ	URSS	IDEM	10	5
Libra- scope	Hewlett-Pack. Singer	Cristal líquido (absorção de calor)	40	104
Modulad. Termo- Plástico	Harris, NCR, CBS, ERIM, Fujinon etc.	Plástico sensível ao calor	1400	5

-----  
Características de Resposta

Nome ou tipo	escrita (ms)	apagamento (ms)	armazenamento
Válvula de luz	10	15	15 ms
Microchannel	10	20	de dias a anos
Pockels	<0.1	<0.1	<2 hs.
PRIZ	<0.1	<0.1	<2 hs.
Librascope	0.005	0.001	meses
Termoplástico	10	100	anos

-----  
TABELA IV.1: Moduladores Espaciais de Luz [36].  
-----

-----  
DISPOSITIVOS DE ENDEREÇAMENTO ELETRÔNICO  
-----

NOME	Desenvolvi- mento	Material Modulador	Resolução (pares de linhas/mm <sup>2</sup> )	Sensibil. Óptica microJ/cm <sup>2</sup>
LightMod	Litton,	Ítrio-ferro (magnetoóptico)	128x128	ND
Talaria	Suíça, GE	Filme de óleo	50	ND
-----				
Características de Resposta				
Nome ou tipo	escrita (ms)	apagamento (ms)	armazenamento	
LightMod	0.001	0.001	anos	
Talaria	15	15	300 ns	

-----  
TABELA IV.2: Moduladores Espaciais de Luz [36].  
-----

Os SLM's de endereçamento eletrônico são geralmente matrizes de dispositivos que podem se tornar opacos ou transparentes, bloqueando a luz ou não. Atualmente a principal tecnologia utilizada neste tipo de SLM é a dos displays de cristal líquido presentes em TV's portáteis, computadores do tipo "laptop" e "notebook", calculadoras eletrônicas etc.

Os SLM's de endereçamento óptico modulam a amplitude ou a fase de um sinal de leitura como função da intensidade de um outro sinal de controle também óptico. A configuração de um SLM deste tipo e a natureza do sinal de leitura são os fatores que efetivamente determinam a real função do dispositivo. Por exemplo, se a refletividade da superfície for diretamente proporcional à intensidade do feixe de controle e o sinal de leitura for de alta intensidade, o modulador funcionará como um amplificador (fig. IV.5.a). Se a refletividade da superfície for inversamente proporcional à inten-

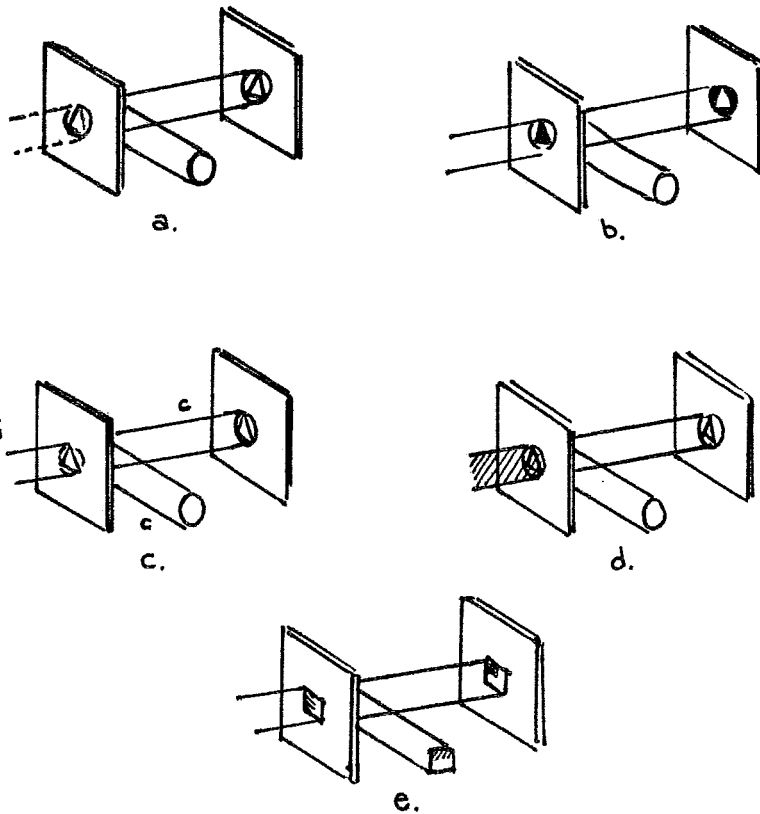
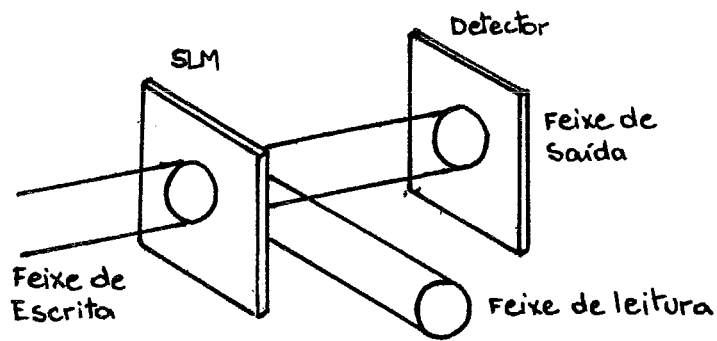


FIGURA IV.5. Exemplo de Modulador Espacial de Luz Óptica e Aplicações [36].

- a. Amplificador
- b. Inversor
- c. Conversor de luz incoerente-coerente
- d. Conversor de comprimentos de onda
- e. aritmética (multiplicação).



sidade do feixe de leitura o dispositivo funcionará como um inversor (fig. IV.5.b). Se o sinal de leitura for um feixe de luz coerente, acontecerá a conversão de um sinal de leitura de luz incoerente para luz coerente (fig. IV.5.c). De forma semelhante, pode ser feita a conversão de comprimento de onda presente no feixe de controle para o comprimento de onda presente no feixe de leitura (fig. IV.5.d). Finalmente, este tipo SLM também pode perfazer operações matemáticas como a multiplicação em padrões geométricos matriciais (fig. IV.5.e).

SLM's de endereçamento óptico são necessários quando a operação computacional tem que ser feita através ou a partir de um sinal óptico, como uma imagem, por exemplo. Atualmente os mais promissores SLM's óptico são feitos com a tecnologia de cristal líquido, a ser explicada no próximo item. Nestes dispositivos, o fotodetector é feito de silício amorfo. Quando a luz incide sobre o silício amorfo, a corrente de polarização através da região do cristal líquido é alterada e portanto a polarização da luz que passa pelo cristal líquido é modificada também. [42]

Dada a importância das tecnologias de displays na fabricação de SLM's faremos alguns comentários adicionais no próximo item.

#### IV.2.7 - Displays

Os mostradores ou displays são elementos chave na exibição de informações em diversos tipos de sistemas e quipa-

mentos. Todos estes dispositivos podem ser enquadrados na categoria de moduladores espaciais de luz ou SLMs ("spatial light modulators"), conforme conceito apresentado no item anterior. Abordaremos de forma sucinta as tecnologias de cristal líquido, plasma gasoso, eletroluminescente e LED.

#### IV.2.7.1 - Displays de Cristal Líquido (LCD'S)

Cristais líquidos são materiais que exibem algumas propriedades intermedárias entre um sólido cristalino e um líquido anisotrópico [48]. As propriedades principais do cristal líquido são a anisotropia óptica e eletromagnética, ou seja, eles se comportam diferentemente segundo a direção de propagação da luz ou das ondas eletromagnéticas. As moléculas que formam estes líquidos cristalinos geralmente têm o formato de bastões e tendem a se alinhar segundo uma determinada direção preferencial, ou seja, têm uma ordem preferencial de orientação. Dependendo do tipo de ordem, podemos ter cristais líquidos de fases nemática, esmética e colestérica.

O tipo de orientação mais propício para a aplicação em displays é a nemática, especialmente a nemática torcida ("twisted"). A fase nemática caracteriza-se pelo fato das moléculas orientarem-se segundo uma direção preferencial de modo que elas estejam, em sua maioria, orientadas sempre paralelas a esta direção preferencial, chamada eixo diretor. Esta fase é, em termos ópticas, uniaxial, ou seja, o eixo óptico sempre está paralelo ao diretor. Esta orientação mo-

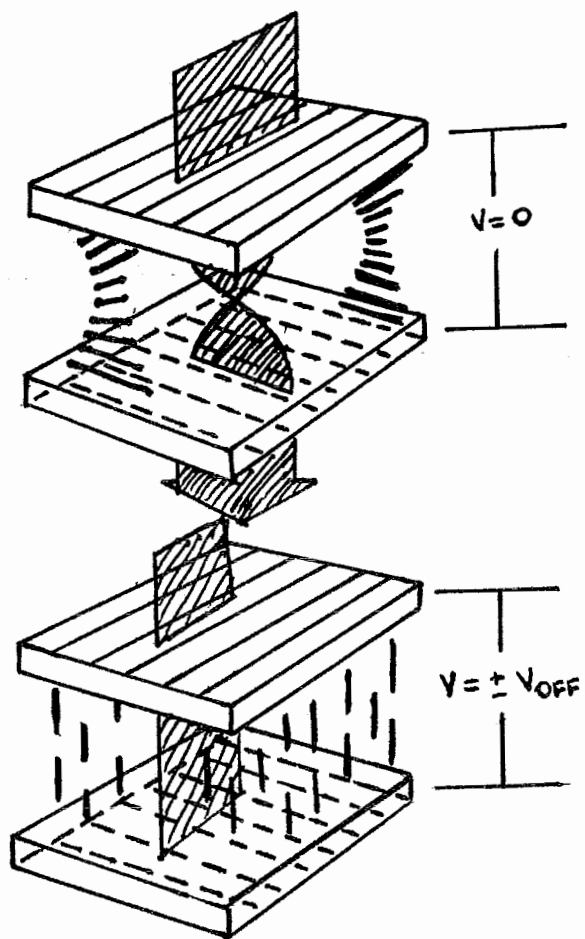


FIGURA IV.6. Cristal Líquido Básico [48].

lecular pode ser facilmente alterada através da aplicação de um campo eletromagnético ou então por superfícies que estejam devidamente preparadas. Esta preparação pode ser efetuada por tratamento controlado das superfícies internas que estão em contato com o líquido cristalino ou pela deposição de camadas, com orientação estrutural adequada para ancoragem molecular. Em contato com esta superfície, o cristal líquido tem as suas moléculas arrumadas de acordo com a orientação preparada.

Se colocarmos um cristal líquido em sua fase nemática entre duas superfícies de orientação perpendicular, teremos uma situação nova, onde as moléculas tendem a se arrumar numa hélice progressivamente entre as duas superfícies. Este é o displays de cristal líquido "twisted" (torcido) a  $90^\circ$ . Um raio de luz polarizado, quando penetra no dispositivo segundo o eixo da hélice formada pelas moléculas de cristal líquido, segue a torção da fase provocada pela arrumação das moléculas e, em consequência, a polarização da luz é modificada em  $90^\circ$ . Cada uma das superfícies são recobertas por eletrodos transparentes. Se a voltagem entre os eletrodos for igual a zero as moléculas estarão arrumadas segundo sua configuração de hélice. Neste caso a luz polarizada segue a mudança de fase imposta pela arrumação dos bastões e acaba por sair do outro lado da estrutura. Caso se aplique uma voltagem diferente de zero entre os eletrodos, devido às propriedades anisotrópicas do cristal líquido, a arrumação das moléculas muda. Neste caso, os eixos dos "bastões" segue

a direção do campo elétrico aplicado, e a luz polarizada não consegue passar pela estrutura pois passa sem alteração de fase através do cristal líquido (figura IV.6). Muito utilizado em informática, este tipo de dispositivo tende a ser substituído por outras tecnologias mais avançadas de cristal líquido, pois apresenta alguns problemas.

Displays de cristal líquido deste tipo, quando são simples, com sete segmentos, por exemplo, podem ter para cada um dos segmentos um driver específico. No entanto, conforme os displays ficam maiores, este tipo de ligação direta pode ser difícil ou anti-econômico. Para reduzir o número de conexões necessárias numa matriz de muitos elementos adota-se um esquema de multiplexação temporal ("time multiplexing") de forma que, numa matriz de  $N \times M$  elementos, serão necessários apenas  $N + M + 1$  linhas de endereçamento, ao invés de  $N \times M + 1$  linhas, como seria o caso de se utilizar o esquema de endereçamento direto.

Em todo caso, este tipo de displays tem baixa taxa de contraste, ângulo de visão estreito e, conforme se aumenta a taxa de multiplexação, a qualidade piora [48].

Um outro tipo de LCD do tipo "twisted" foi proposto em 1986, no qual o ângulo de torção, ao invés de  $90^\circ$ , estaria entre 180 e 270 graus. Este LCD, chamado "super twisted", comprovou ter características bem melhores do que o tipo "twisted" simples, com maior contraste e maior ângulo de visão [48]. Entretanto, estes displays não se prestam à exibição de várias escalas de cinza, em aplicações que requeiram

vídeo colorido e aplicações gráficas que requeiram alta velocidade, sendo utilizados em laptops de baixo custo.

Computadores de categoria mais elevada utilizam-se de uma display de cristal líquido que é mais eficiente e sofisticado que os descritos anteriormente: são os displays com matrizes ativas de endereçamento, ou "active matrix displays". Este tipo de endereçamento resolve os problemas encontrados nos displays "super twisted" por que cada pixel tem sua própria chave, ou seja, cada elemento da matriz tem um transistor ligado em série. Comutando-se o estado destes transistores os pixels selecionados passam a estar completamente isolados dos pixels não selecionados, obtendo-se melhores resultados que o esquema de multiplexação utilizado em outros tipos de displays. Pode-se obter um display colorido depositando camadas que filtrem as três cores utilizadas num TV, vermelho, verde e azul, misturando-as como se faz com um tubo de raios catódicos. Cada ponto da imagem seria assim composto de três pontos: um vermelho, um verde e outro azul (RGB).

Os transistores utilizados para a sensibilização direta dos pixels são geralmente feitos em filme fino de silício amorfo. A utilização de silício amorfo é justificada pela facilidade de depositá-lo sobre um substrato de baixo custo como vidro, ao invés do silício policristalino que, por requerer maiores temperaturas de processamento, só permite a utilização de substratos mais caros como quartzo, por exemplo. Além de se fabricar displays de matriz ativa com tran-

sistores, pode-se fabricá-los também com diodos, que são mais simples e permitem maiores "yields" [49]. Obviamente, o custo do dispositivo é altamente dependente do "yield" obtido, tornando a situação mais crítica ainda quando se processa dispositivos de área grande como um LCD. Assim, quase sempre é recomendável dimensionar o equipamento para produzir displays realmente grandes de forma que se possa obter um "yield" de quase 100% para pequenos displays no mesmo equipamento, aumentando-se a escala de produção e diminuindo-se os custos.

Até o presente momento, displays de matriz ativa estão sendo utilizados principalmente em aplicações e produtos onde eles oferecem grande vantagem sobre outros tipos de dispositivo, leia-se, tubos de raios catódicos: computadores pessoais, mini-televisores, equipamentos de áudio e vídeo e painéis de automóveis. Utilizando-se tal display tem-se pequeno consumo de potência, pequena espessura e legibilidade à luz do sol.

#### IV.7.2.2 - Displays de Plasma Gasoso, Fluorescentes e LED

Além da tecnologia LCD, líder do mercado de displays planos, temos ainda outras tecnologias de displays como a de plasma gasoso, fluorescência e LED, dentre outras.

A tecnologia de plasma gasoso proporciona um display plano que emite luz própria, ao contrário do LCD, que não gera luz. A luz deste tipo de displays é proveniente de des-

carga elétrica num gás, geralmente neônio ou xenônio, que então passa para o estado de plasma, emitindo luz. Fisicamente, o displays é composto por dois substratos de vidro onde se encontram o conjunto de eletrodos, perpendiculares entre si. No espaço entre estes dois substratos está confinado um gás (geralmente neônio) e, quando se aplica uma voltagem da ordem de 100 a 200 volts entre dois eletrodos ocorre uma descarga que gera luz, geralmente na cor laranja.

O display de plasma gasoso compete fortemente com os displays de cristal líquido no mercado. Embora os LCDs ofereçam custo mais baixo e menor consumo de energia, eles tem tempo de resposta muito alto e ângulo de visão menor que o desejável. Já o display de plasma gasoso tem tempos de resposta bem menores, maior ângulo de visão e contraste, embora consuma mais energia que o LCD.

O display fluorescente, que foi muito utilizado em calculadoras eletrônicas e instrumentos de medição, é basicamente um triodo com diversos anodos cobertos de fósforo. O catodo, quando aquecido, serve de fonte de elétrons e uma grade é usada para controlar o movimentados elétrons em direção ao anodo cujo fósforo, quando atingido pelos elétrons, emite luz de tonalidade verde ou verde-azulada. Suas principais aplicações estão no segmento de consumo, acoplados a video-cassetes, CD-players além de painéis de automóveis.

Os displays de LEDs são matrizes de LEDs que se prestam a diversas aplicações: outdoors, sinalização pública, luz de freio para carros, etc. devido á sua luminosidade e



resistência à intempérie.

#### IV.7.2.3 - Comentários

Conforme as escalas de produção forem aumentando e as tecnologias forem aprimoradas espera-se que o relação custo/benefício seja tão favorável que o mercado de displays planos engolirá praticamente o mercado de tubos de raios catódicos. A nível atual, por exemplo, existe pouca diferença entre uma imagem gerada por um display de cristal líquido e um tubo de raios catódicos. Não haverá diferença entre um computador portátil e um de mesa. Telas maiores e de mais alta resolução estarão disponíveis, podendo ser utilizadas em estações de trabalho.

Mas talvez o maior filão de mercado para aplicação de displays planos de alta resolução e grandes dimensões (40 polegadas de diagonal, por exemplo) seja o dos equipamentos de televisão de alta definição (HDTV) [50]. É realmente pouco provável que o consumidor prefira um tubo gigantesco de 40 polegadas, ou um projetor de vídeo, geralmente de grandes dimensões para uso doméstico. A escolha natural será a utilização de um display de cristal líquido ou plasma gasoso policromático, de pequena espessura, mais econômico e elegante.

#### IV.2.7 - Armazenamento Óptico

A presença das tecnologias optoeletrônicas no armazenamento de grandes volumes de dados está calcada principalmente nos sistemas de armazenamento em discos ópticos de diversos tipos e padrões.

As principais vantagens das tecnologias de armazenamento óptico são sua grande capacidade de armazenamento e ausência de contato entre a cabeça de leitura e a superfície do disco, o que diminui ou impossibilita os danos a que estão sujeitos os discos magnéticos. A principal desvantagem dos discos ópticos é o grande tempo de acesso às informações gravadas, relativamente à velocidade dos discos whinchester.

Existem três tecnologias básicas para este tipo de produtos [56][57]:

- discos apenas para leitura;
- discos graváveis apenas uma vez (WORM - "write once read many");
- discos apagáveis/regraváveis.

Todos estes tipos de discos ópticos chegam ao mercado numa grande variedade de tamanhos, formatações, protocolos, etc. Pode-se, por exemplo, encontrar discos do tipo WORM com diâmetros de 5,25, 8, 12 e 14 polegadas. Além da falta de padronização em relação às suas dimensões, discos do tipo WORM com dados gravados num determinado fabricante podem não ser lidos no drive de outro fabricante, por problemas de formatação.

As mesmas observações se aplicam aos discos ópticos apagáveis/regraváveis, embora a maioria dos discos deste tipo lançados no mercado até agora tenham um tamanho de 5,25 polegadas, indicando uma certa tendência à padronização de suas dimensões. Entretanto os padrões de formatação destes discos ainda não estão bem desenvolvidos e, mesmo na questão da padronização de suas dimensões nada de conclusivo pode ser afirmado, já estão em desenvolvimento discos ópticos apagáveis/regraváveis com dimensões de 3,5 e 2 polegadas de diâmetro.

A tecnologia mais antiga e sem dúvida mais padronizada é a dos discos apenas para leitura, da qual fazem parte os CD-ROM's, compact discs de áudio, video-discs e CD-I. O caso exemplar é o do formato de 12 polegadas de diâmetro, que é utilizado em CD-ROM's, CD-Video, Compact Discs de áudio. Graças aos esforços de padronização de Phillips e da Sony, que desenvolveram este formato, CD-ROM's de qualquer fabricante podem ser lidos em qualquer leitor de CD-ROM's. Na realidade é possível se utilizar toca-discos desenvolvidos para reproduzir tanto discos musicais de áudio, acoplados ao conjunto de som, quanto CD-ROM's, acoplando-se o aparelho ao computador.

Analisemos cada uma destas tecnologias.

#### IV.2.7.1 - Discos Apenas para Leitura

É sem dúvida o mais utilizado tipo de armazenamento óptico, constituindo grande mercado nas áreas de entreteni-

mento e informática. Na realidade foi a introdução dos discos compactos de áudio que proporcionou a esta tecnologia o destaque que tem atualmente, com rápida difusão principalmente no Japão e EUA. Logo começaram a se tornar mais populares os CD-ROM's, utilizados nos computadores para armazenamento de grandes bases de dados e/ou pacotes de programas.

A gravação dos dados é feita na fábrica e, uma vez realizada a gravação não é possível alterar o conteúdo do discos, que podem armazenar cerca de 600 megabytes.

Este tipo de disco é fabricado de forma similar ao LP de vinil, ou seja, são feitas matrizes que, por processos de deposição eletrostática e separação mecânica, originam as prensas finais. Na matriz estão gravados os "pits", que são pequenas reentrâncias que representam o sinal digital gravado, mais tarde transferidos para as prensas.

Feitas as prensas, o material com que é feito o substrato do disco, o policarbonato, sofre um processo de fundição e prensagem, onde o padrão presente nas prensas é transferido para o plástico. O policarbonato é um termoplástico fabricado a partir de fosgênio e bifenol A, classificado como plástico de engenharia devido às suas características tecnológicas: alta dureza superficial, ótima resistência, transparência próxima à do vidro e fácil moldagem. O resultado é um disco transparente de 12 cm de diâmetro, com todas as informações gravadas na sua superfície através de uma espiral de "pits". Como a leitura das informações gravadas no

disco depende da reflexão da luz do laser em sua superfície, coloca-se uma superfície refletora através da evaporação de alumínio na face gravada do disco. Posteriormente esta camada de alumínio é protegida por uma resina e, em cima desta resina, podem ser impressas informações de natureza diversa para a o usuário (o nome da base de dados, o nome das músicas, número de série, etc.).(figura IV.7).

#### IV.2.7.2 - Discos Graváveis Apenas Uma Vez (WORM)

Os discos WORM ("write once read many") possibilitam que o usuário possa gravar o material que quiser, ao contrário do CD-ROM, que já vem gravado de fábrica. O problema é que o usuário deve escolher muito bem o que vai gravar num destes discos, pois não poderá apagá-lo posteriormente.

A estrutura mais comum deste tipo de disco é composta por um "sanduíche" onde uma camada destinada à gravação está prensada entre duas camadas de plástico. Um laser de potência relativamente alta deixa marcas na superfície da camada de gravação. A leitura é efetuada por uma fotodetector que capta a luz refletida pelo disco, originária de uma feixe de laser de baixa potência. Existem diversas maneiras de se "deixar marcas" num disco WORM. Em algumas, a absorção da energia térmica de um feixe de laser forte o suficiente causa a vaporização da camada de gravação, que por sua vez provoca o aparecimento de uma bolha na camada adjacente. Em outro tipo de disco o laser abre um orifício no material de uma das camadas do disco, deixando exposta uma camada inter-

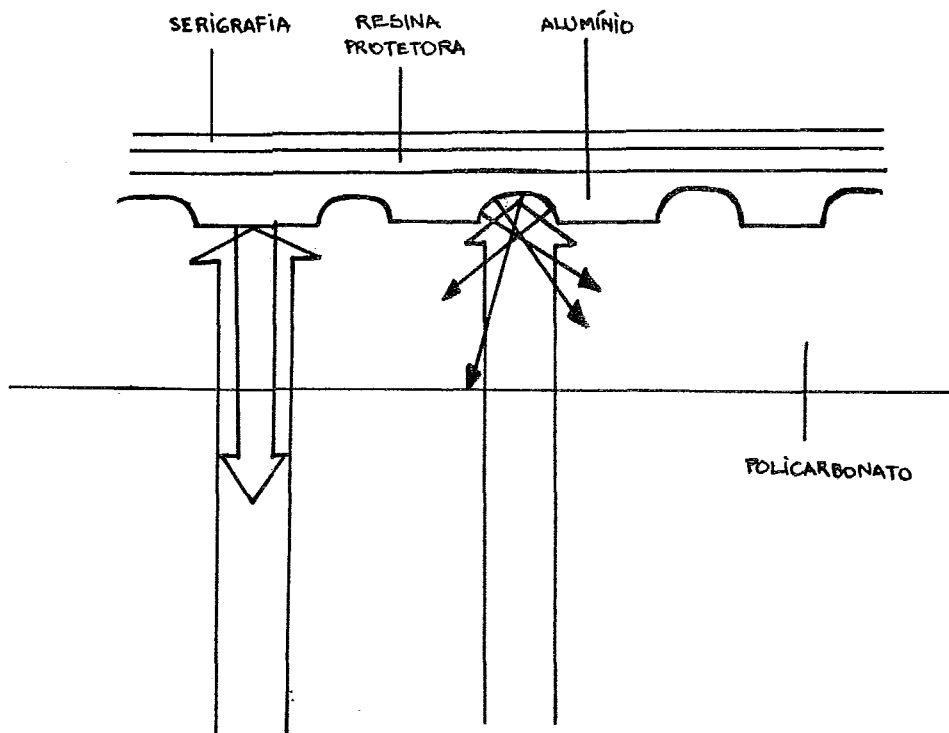


FIGURA IV.7. Esquema de um CD ("compact disc") e a reflexão do feixe de laser em sua superfície [El. própria].

na altamente refletora abaixo da região ativa. A presença ou a ausência desta superfície altamente refletora determinará maior ou menor reflexão do feixe de laser e portanto que tipo de sinal lógico o fotodetector captará.

Um material comum em discos WORM é o telúrio. Quando o laser de escrita incide sobre a camada de gravação o telúrio torna-se líquido, e a tensão imposta pelas camadas adjacentes, no sentido de expandir o material, acaba por deixar um buraco na camada de telúrio, após o seu resfriamento.

A figura IV.8 mostra o exemplo de sistema de leitura de um disco WORM, similar ao de um CD-ROM.

#### IV.2.7.3 - Discos Apagáveis/Regraváveis

A tecnologia utilizada em discos apagáveis/regraváveis é conhecida como magneto-óptica. O principal objetivo desta tecnologia é combinar a facilidade de apagamento de dados existente nos discos magnéticos com a alta capacidade de armazenamento das tecnologias ópticas, sem falar na ausência de contato entre disco e cabeça de gravação proporcionada pela tecnologia óptica, com a conseqüente possibilidade de remoção do disco de seu "drive" [56][57][51].

A camada ativa deste tipo de disco, onde ficam armazenados os dados, é magnética e se encontra depositada sobre um substrato transparente, geralmente policarbonato e, algumas vezes, vidro. A informação é armazenada na forma de bits, onde o sentido do campo magnético determina se o bit é "1" ou "0". Num disco não gravado, todos os bits magnéti-

cos estão no sentido "0".

A intensidade que deve ter um campo magnético externo para anular e/ou alterar o sentido de magnetização de um material é conhecida como força coerciva ou coercividade. A coercividade é dependente da temperatura aplicada à região ativa do disco. Na temperatura ambiente, a aplicação de um campo magnético próximo à superfície do disco é insuficiente para mudar o seu "status" magnético porque a força coerciva necessária é muito alta. Assim, em que pese a presença de um campo magnético de sentido contrário à magnetização existente no disco, nada é alterado se a temperatura não for superior ao chamado "ponto Curie", quando se torna possível alterar o sentido magnético das informações. O "ponto Curie" se situa em torno de 150°C e nesta temperatura a força coerciva é praticamente nula, permitindo a alteração do sentido magnético dos elementos do disco.

Vejamos como se dá o processo de gravação. Para se obter a temperatura de 150°C na camada de gravação utiliza-se um feixe de laser, focado sobre a trilha do disco que se quer alterar. Toda a área de gravação deve estar em nível lógico "0". Durante o processo de gravação o disco gira e, enquanto é aplicado um campo magnético no sentido lógico "1", o laser acende naqueles pontos onde se quer gravar bits no nível lógico "1". Após o resfriamento do meio magnético, a informação fica gravada.

No processo de apagamento o campo magnético está voltado para o sentido lógico "0" e, quando é aplicado o calor



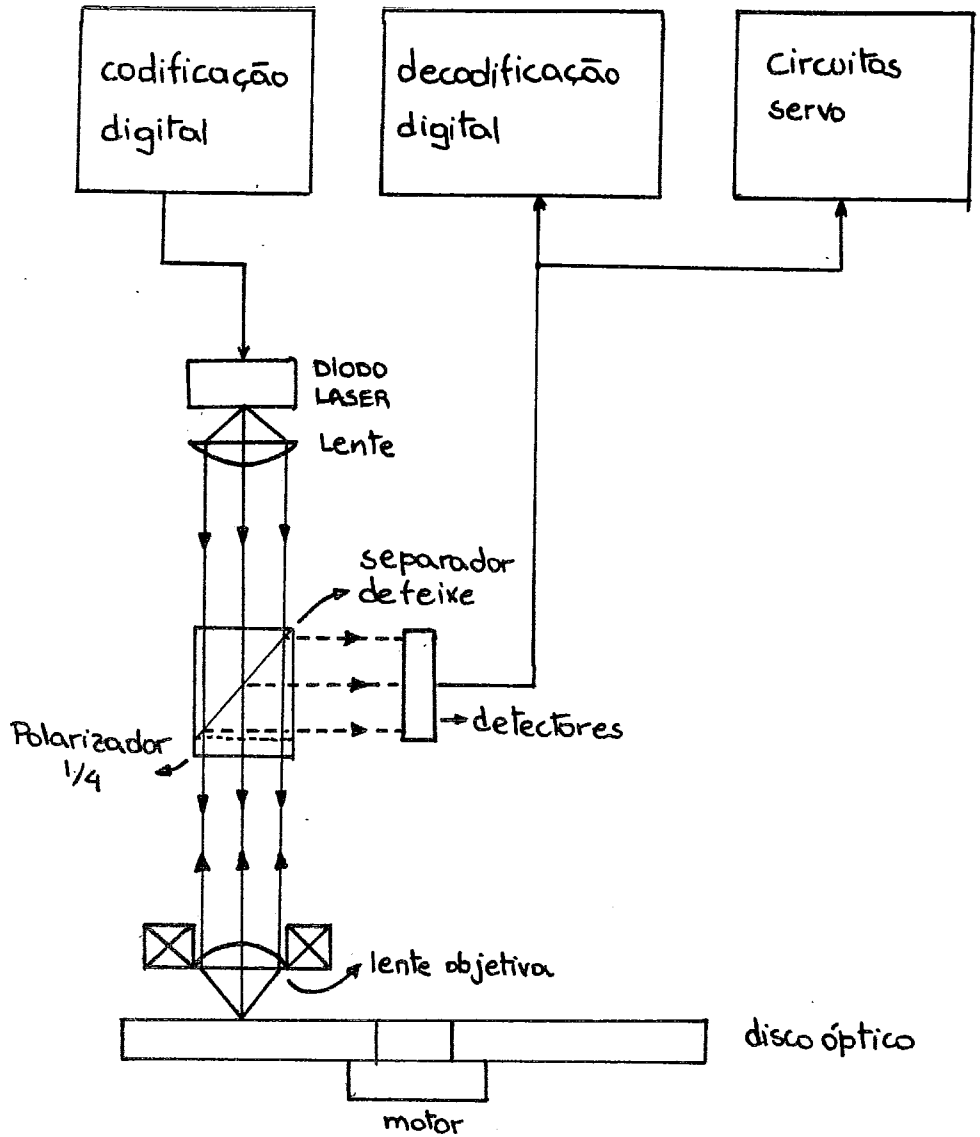


FIGURA IV.8. Sistema de leitura/escrita WORM [47]

do feixe de laser em determinado ponto, este ponto fica magnetizado no nível lógico "0", ou seja, apagado.

Note-se que, durante o processo de gravação, todos os bits devem estar no nível lógico "0", ou seja, apagados, para, posteriormente, serem alterados ou não para o nível lógico "1", formando uma sequência de "1's" e "0's". Assim, caso seja necessário gravar determinada informação num trecho do disco que já está ocupado deve-se, primeiro, apagá-lo (tornar todos os "1's" para "0's") e, depois, gravar os "1's" nos pontos necessários naquele trecho. Assim todo o processo de gravação é precedido de um processo de apagamento.

Para ler as informações gravadas utiliza-se um feixe de laser polarizado de baixa potência para detectar as orientações magnéticas presentes nos bits da camada ativa do disco. Existe um efeito magneto-óptico denominado "efeito Kerr", no qual a luz refletida por uma superfície magnetizada tem a fase alterada segundo o sentido do campo magnético presente naquela superfície. Utilizando-se esta propriedade, o sentido da magnetização dos bits gravados no disco pode ser descoberta através da recepção da luz refletida e pela análise da mudança de fase ocorrida.

Num disco magneto-óptico, a informação é gravada em sulcos abertos no substrato com o objetivo de proteger a informação e, portanto, aumentar a confiabilidade do meio de armazenamento. A focalização do laser em cima dos dados magnéticos é facilitada pelos sulcos, já que a cabeça de leitu-

ra pode sentir, através da difração da luz, se a feixe refletido veio do interior de um sulco ou de fora dele, enviando esta informação para um sistema realimentado que tratará de realinhar a cabeça de leitura para que o feixe de laser incida sobre o local correto.

As principais vantagens da utilização de discos magneto-ópticos são:

- Alta capacidade de armazenamento. Na medida em que o feixe de laser pode ser focalizado um espaço tão pequeno quanto 1 micrômetro, pode-se armazenar informações num meio de alta densidade, num fator que varia de 10 a 1000 vezes em relação aos meios magnéticos mais comuns. Uma disco deste tipo, seguindo o padrão ISO, de 5,25 polegadas, pode armazenar até 650 mega-bytes.

- Portabilidade. Note-se que, apesar de poder armazenar cerca de 650 mega-bytes, este disco está contido dentro de uma cartucho que o protege de poeira e outros danos, podendo, assim ser removido corriqueiramente de seu "drive" assim como um disquete flexível.

- Confiabilidade. Como não existe contato físico entre a superfície do disco e a cabeça de leitura/gravação, eliminando-se desgastes e os chamados "head crashes", característicos dos discos magnéticos. Além disto o apagamento acidental do disco por campos magnéticos não desejáveis é praticamente impossível, já que a coercividade do meio magnético é muito alta.

A principal desvantagem da tecnologia magneto-óptica,

frente às tecnologias mais avançadas de armazenamento magnético, são:

- Baixa velocidade. Discos magneto-ópticos são, em média, duas vezes menos, rápidos que discos rígidos magnéticos de desenvolvimento mais recente [54]. Existem dois principais motivos para que isto aconteça: a inércia do conjunto óptico necessário à leitura e gravação, de estrutura complexa e de dimensões relativamente grandes, e a necessidade de se apagar um trecho do disco antes de gravar algo nele, o que implica que é necessária uma volta do disco para o processo de apagamento e outra para o processo de gravação. Nos discos magnéticos normais o processo de gravação confunde-se com o processo de apagamento, sendo necessária apenas uma volta para se completar a tarefa.

#### IV.2.7.4 - Tendências

Existem duas principais tendências no desenvolvimento de tecnologias optoeletrônicas ligadas aos discos ópticos: a redução de peso do conjunto de leitura/escrita dos drives e os discos com base no princípio de mudança de fase ("phase-change") [52][53].

O conjunto óptico de leitura e gravação utilizado em discos magneto-ópticos deve ser sensível o suficiente para detectar a mudança de fase devida ao efeito Kerr, como já foi exposto. Além disto, é necessário, numa mesma cabeça de gravação/leitura, montar os sistemas optoeletrônicos e magnéticos referentes às fases de gravação e leitura. Esta es-

trutura tem dimensões e massa maiores que os sistemas existentes em discos ópticos do tipo CD e WORM, e muito maiores que as estruturas existentes em discos magnéticos rígidos. Em termos práticos, esta disparidade resulta em tempos de acesso de 2 a 6 vezes maiores que sistemas equivalentes, dependendo da operação a ser efetuada [56].

As pesquisas buscam a redução da massa efetiva do conjunto (que em 1989 estava em torno de 100 gramas, com tempos de acesso em torno de 100 milisegundos) através da integração da cabeça óptica, ou seja, a integração em uma peça de todas as função efetuadas pelo laser, objetiva, detectores, etc.[56]. Uma tentativa de obter tal dispositivo está ilustrada na figura IV.9 .

Uma tecnologia importante nesta área e que já está sendo comercializada é a tecnologia de mudança de fase ("phase change") [53]. Neste tipo de disco, a gravação pode ser feita em apenas uma passagem da cabeça de gravação na região a ser alterada. Como vimos anteriormente, um dos fatores limitantes da performance dos discos magneto-ópticos é o fato de que, numa operação de gravação, é necessário o apagamento prévio dos sinais gravados para, posteriormente, se efetuar a gravação propriamente dita, o que toma o tempo equivalente a duas voltas do disco. Este problema não existe na tecnologia de mudança de fase.

A base desta tecnologia são materiais que tem dois estados estruturais estáveis. Estes materiais, geralmente baseados em telúrio ou selenio, tem a propriedade de se manter

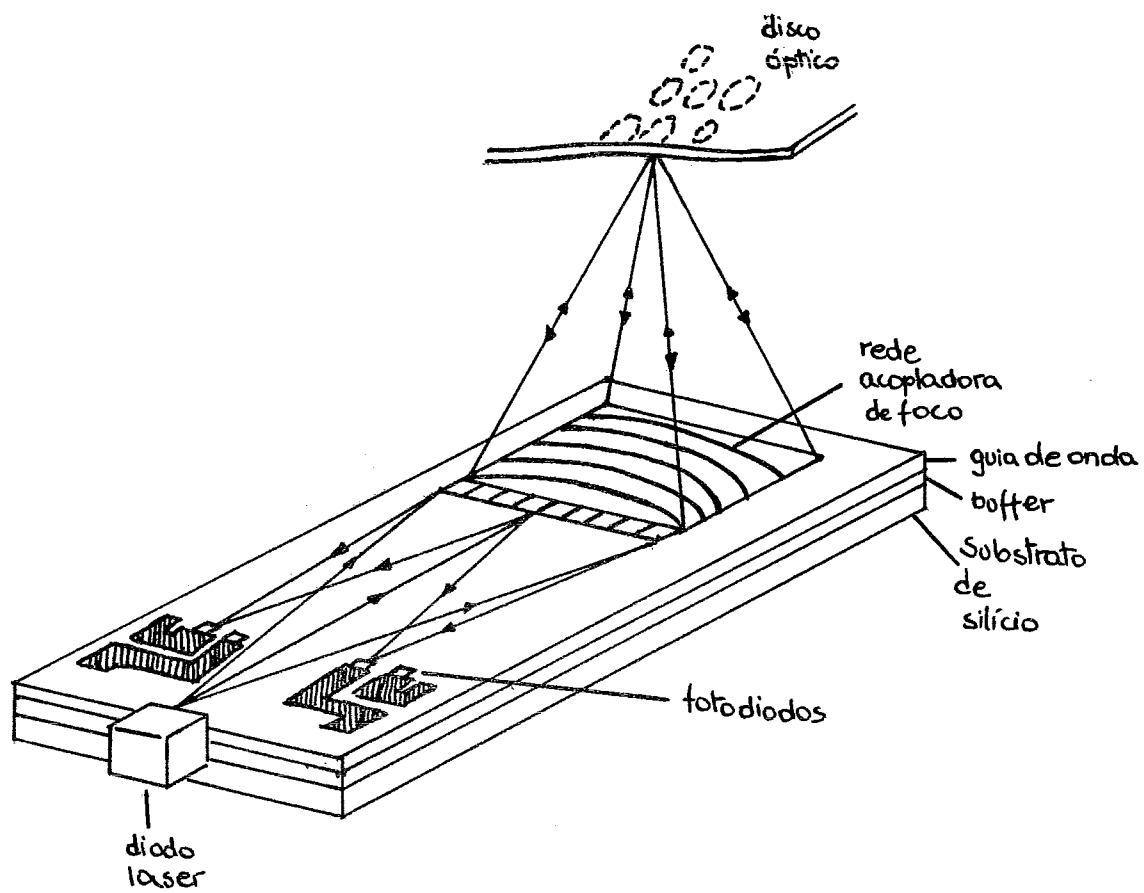


FIGURA IV.9. Cabeça óptica integrada [17]

tanto num estado cristalino quanto num estado amorfo, isto é, quando as partículas do material se encontram organizadas de maneira aleatória, ao contrário de uma estrutura cristalina. Na medida em que a refletividade de cada um destes estados é bem diferenciada, possibilitando fácil leitura por parte de um fotodetector, torna-se mais factível a utilização de estruturas mais leves que as existentes nos conjuntos ópticos dos discos magneto-ópticos, feitas para detectar a tênue rotação de fase decorrente do efeito Kerr. Logo, levando-se em conta apenas esta variável, os sistemas de mudança de fase já seriam mais rápidos que os discos MO.

Estretanto a característica mais importante é o tempo economizado nos processos de gravação em apenas uma volta do disco.

Isto é possível graças à utilização criteriosa da potência do laser de gravação. Inicialmente consideremos que o material do disco está no estado amorfo. A incidência de um feixe de laser de 8 mW, aumentando a temperatura do material da camada de gravação, é suficiente para mudar seu estado quando, depois de frio, o material assume uma estrutura cristalina naquele ponto específico. Chamaremos a temperatura na qual esta transição ocorre de temperatura de cristalização.

O estado amorfo é induzido pelo aumento de temperatura causado por um feixe de laser de 18 mW, mais potente que o anterior. A temperatura na qual o material derrete para depois tornar-se amorfo é maior que a temperatura de cristali-

zação. Este processo é chamado de revitrificação e possibilita a mudança direta de uma estado amorfo para uma estado cristalino e vice-versa. Assim, quando um feixe de 18 mW atinge um ponto cristalizado, este derrete e quando esfria se torna amorfo. Caso este feixe atinja um ponto no estado amorfo, este continuará amorfo quando esfriar. Por outro lado, caso um feixe de laser de 8 mW atinja um ponto no estado amorfo, este passará para o estado cristalino, e caso o ponto já estivesse no estado cristalino ele continuaria assim, porque o laser não teria potência suficiente para fundi-lo.

Os discos baseados neste princípio devem, progressivamente, substituir os discos magneto-ópticos e competir com os discos rígidos magnéticos. Existem produtos no mercado que, atualmente, deixam muito a desejar em relação ao desempenho (90 milisegundos de tempo de acesso, em média, ou seja comparável aos piores discos magneto-ópticos).

Os produtos baseados em tecnologia de armazenamento em discos ópticos constituem, atualmente, o principal setor demandante de dispositivos optoeletrônicos [55].

#### IV.3 - Setor de Entretenimento

O setor de entretenimento é considerado o maior demandante por componentes eletrônicos [55][58][59]. Por isto é considerado como um setor fundamental para a penetração de tecnologias ópticas. De fato, a crescente difusão dos toca-discos digitais, seja de áudio ("compact disc", CD's) como de vídeo ("laser vision", "video disc") além de equipamen-



tos baseados em displays de cristal líquido (TV's portáteis e de projeção) contribui para o aumento das escalas de produção de lasers semicondutores, fotodetectores, circuitos integrados optoeletrônicos, conjuntos de lentes, LCD's etc..

Apesar das altas escalas de produção proporcionadas por este segmento do complexo eletrônico [59](agora já não tão eletrônico assim) as principais pesquisas nas áreas de optoeletrônica são dedicadas aos segmentos de computação e comunicações, sendo que o segmento de entretenimento aproveita algumas das inovações propostas para aqueles outros segmentos. É nota'vel, entretanto, a crescente convergência dos segmentos de eletrônica de consumo e de eletrônica profissional, como acontece com a popularização de tecnologias antes tidas como profissionais, como microcomputadores tipo PC, PS/2, Macintosh, equipamentos de áudio e vídeo mais sofisticados etc..

Do ponto de vista das aplicações de dispositivos optoeletrônicos neste segmento de consumo destaca-se o CD de áudio, já devidamente explicado no item sobre discos ópticos. O mercado de CD's no Japão já ultrapassou deste 1986 o mercado de LP's. O mesmo está acontecendo nos Estados Unidos em 1990 e dentro em breve o mesmo acontecerá na Europa.

A qualidade sonora potencial dos "CD players" (toca-discos digitais) está gerando a introdução de uma série de inovações neste segmento de eletrônica de entretenimento, inovações estas associadas ao próprio equipamento de reprodu-

ção: aumento da capacidade de amostragem do sinal obtido dos CD's, diversas arquiteturas nos sistemas internos de filtração digital, melhoria do tempo de acesso às faixas do disco, etc.

No que se refere à optoeletrônica propriamente dita, podemos apontar como principais inovações a utilização de fibras ópticas na interconexão entre módulos de uma equipamento de áudio e a utilização da tecnologia de displays de cristal líquido para TV's portáteis e de projeção.

Acopladas a circuitos integrados optoeletrônicos de configuração bem simples, as fibras possibilitam a transferência de informação com mínima perda de sinal digital, principalmente entre o "CD player" e o amplificador.

Outra importante, e cada vez mais popular, aplicação da optoeletrônica em equipamento de entretenimento é a substituição do cinescópio das televisões e monitores de computador por display's de cristal líquido - LCD's. No que tange à monitores de computador, a penetração deste tipo de dispositivo está cada vez mais evidente, principalmente em equipamentos do tipo portátil, "laptops" ou "notebooks", onde sua pequena espessura, baixo peso e baixo consumo de energia fazem dos LCD's a opção mais correta quando se pensa num substituto para o tubo de raios catódicos. Televisões portáteis de bolso existem graças ao display de cristal líquido, quase no estilo "Dick Tracy" de televisões de pulso.

Esperamos, ainda, que a introdução de sistemas de televisão de alta definição (HDTV - "High Definition TV") ve-

nha a tornar-se mais um enorme campo de aplicação das tecnologias de optoeletrônica e fotônica. Isto por dois motivos básicos:

- a alta definição da imagem deste tipo de aparelho, composta de 1.125 linhas contra as 525 linhas atuais (tomando-se como referência o sistema proposto pelo Japão - o Hi-Vision), requer telas bem maiores que as atuais, de forma a aproveitar de modo completo a fidelidade proporcionada pelo sistema (afinal, qual a graça de se ver filmes como "Lawrence da Arábia" de David Lean ou "2001" de Kubrick na telinha televisiva atual?). A telinha de hoje tem dimensões de 4:3, enquanto que o sistema Japonês tem 16:9. Colocar uma grande tela de, digamos, 2 metros de diagonal, ou seja, com uma largura de 174 cm e altura de 98 cm, numa sala de estar poderia ser o inferno ou o paraíso para o feliz possuidor de tal artefato, fosse ele feito com um tubo de raios catódicos de dimensão e peso gigantescos ou com fino painel feito de diversos elementos de cristal líquido, pendurável em qualquer parede compatível com sua largura. Assim torna-se muito desejável a utilização de tecnologias de estado sólido como a do cristal líquido para a implementação de tais aparelhos;

- a HDTV provavelmente não se prestará apenas para a recepção de sinais de emissoras de TV ou play-back de video-discos ou video-cassetes, mas também como interface visual de diversos equipamentos a ela acoplados, como computadores, redes de serviços integrados, telefonia, tendo ela própria capacidade de armazenamento de informações diversas

através dos memórias e processadores de alta capacidade a serem utilizados em sua montagem. Evidentemente, todo este sistema informático deverá estar acoplado a facilidades de telecomunicações compatíveis com o volume de informações utilizado assim como com a rapidez do equipamento. Para isto, a solução é a utilização de redes de fibras ópticas que atinjam o "loop" dos assinantes, ou seja, que seja possível conectar o usuário final através de fibras ópticas em sua própria casa ou escritório.

Obviamente a introdução deste tipo de tecnologia ao nível do assinante médio pode vir a representar um grande mercado nas áreas de fibras ópticas, diodo lasers e fotodetectores, além de circuitos integrados. Daí a importância da tecnologia de HDTV pelo seu impacto multiplicador nas áreas de telecomunicações e microeletrônica.

#### IV.4 - Aplicações Militares

As aplicações da optoeletrônica e da fotônica encontram no meio militar um campo fértil de pesquisas e desenvolvimento, já que tradicionalmente o setor militar é provocador de inovações tecnológicas radicais em setores de tecnologia de ponta.

A utilização militar de lasers vai desde sensoriamento e cálculo na pontaria de alvos diversos como no controle remoto, através de fibras ópticas, de mísseis de curto e médio alcances [62][61][60].

Vejamos com maior profundidade algumas destas aplica-

ções:

- mísseis guiados por um feixe de luz gerado por lasers, onde um conjunto de diodos lasers aponta para um alvo em determinada sequência pulsos e o foguete reconhece o sinal e segue na direção do alvo iluminado;

- mísseis dirigidos por fibras ópticas, onde uma fibra óptica, conectada a um míssil, permite o envio do sinal proveniente de uma pequena câmera de vídeo colocada no projétil, assim como envio de sinais de direcionamento por parte do operador. Geralmente este tipo de míssil tem alcance de 10 a 15 km. Uma variação deste míssil é aquele que é guiado pela fibra durante os primeiros 10-15 km, sendo depois desconectado e seguindo o seu trajeto normal como míssil teleguiado;

- míssil guiado por radar óptico, onde o projétil tem três lasers de alta potência que, tendo seus sinais refletidos no alvo, permitem a localização do objeto a ser atingido;

- giroscópio óptico, feito de fibras ópticas e com luz de um diodo laser. Permite melhor aproveitamento do espaço num míssil, pois seu tamanho é muito menor que o dos giroscópios usuais, mecânicos [64][68][73].

Além destas utilizações, a optoeletrônica está sendo utilizada militarmente para a implementação de sistemas de comunicação nos campos de batalha. Seu uso é justificável pelas seguintes características:

- leveza e pouco volume, o que permite menor tempo de

transporte e facilidade de instalação através de helicópteros;

- imunidade a interferências;

- imunidade a pulso eletromagnético, permitindo que sistemas baseados em fibras ópticas não sejam potenciais "antenas" dos pulsos eletromagnéticos gerados por explosões nucleares;

- segurança, pois é mais difícil interceptar informações de uma fibra óptica sem seccioná-la, ao contrário dos cabos elétricos tradicionais.

Outra aplicação da optoeletrônica nos campos de batalha deriva da necessidade de se localizar um alvo à noite sem denunciar a própria presença: são os sistemas de visão noturna, onde se faz a conversão da luz infravermelha presente numa imagem para a luz visível [70][71][72]. Assim é necessário que se amplifique a luz infravermelha presente no ambiente iluminado por alguma fonte de luz infravermelha (um diodo laser, por exemplo) e depois transforma-se o sinal infravermelho detectado para uma faixa de luz visível.

Existem diversos outros nichos dentro do mercado militar onde a optoeletrônica e a fotônica cumprem papel fundamental, como o de sensores de fibras ópticas, que medem pressão, temperatura, nível de líquidos ou movimento, células solares, sistemas de reconhecimento de padrões, ligado evidentemente às pesquisas de processamento óptico de sinal através de transformadas de Fourier e inteligência artificial, além do conceito de estruturas inteligentes em aviões

[66].

De qualquer forma, quase todas as tecnologias desenvolvidas prioritariamente para aplicação militar tem meios de chegar ao mercado profissional civil com relativa facilidade, levando-se em conta que a transformação de uma tecnologia em produto passa por várias etapas intermediárias nas quais pode-se criar um produto "híbrido."

Um exemplo são os sensores baseados em fibras ópticas, que, se do lado militar são utilizados para a construção de sonares e equipamento de sensoriamento e coleta de dados em ambientes muito agressivos (no caso de guerra química ou nuclear), do lado civil podem auxiliar na prospecção de petróleo, cardumes de peixes, controle de reservatórios em indústrias e refinarias, etc. [65][67]

Outro exemplo são os sistemas visuais de detecção de temperaturas. Se no campo de batalha este tipo de equipamento pode auxiliar na localização de tanques e até de corpos humanos baseado no calor que deles emana, pode ser utilizado também como equipamento de segurança preventiva na manutenção de plantas industriais onde possam ocorrer vazamentos em tubulações que contenham material com determinada temperatura detectável pelo sensor, na segurança patrimonial, testes industriais baseados em infra-vermelho, etc.[68][70]

#### IV.5 - Aplicações em Medicina

Assim como a optoeletrônica pode ser um instrumento para a morte, pode servir para salvar vidas. Este é o caso

da utilização de lasers em medicina. Lasers são utilizados principalmente em cirurgias em todos os campos da medicina como instrumentos de corte, sendo que a grande "estrela" do setor é o laser de CO<sub>2</sub>, seguido pelo laser Nd:YAG ("Ytrium Alluminium Garnet" dopado com Neodímio).

As grandes vantagens da cirurgia através de raios laser estão sempre ligadas às condições operatórias (tanto do ponto de vista do médico quanto do paciente) e melhores condições de recuperação no período pós-operatório.

A cirurgia por laser sempre é mais precisa, podendo ser utilizada em cirurgias delicadas de forma mais simples e tranquila do que com um bisturi. Por ser um instrumento mais preciso, as operações realizadas com laser tendem a ser menos invasivas, ou seja, reduzem os efeitos negativos da invasão do corpo por um objeto estranho. Esta característica da cirurgia a laser faz com que muitas pequenas operações, que antes necessitavam procedimentos hospitalares típicos (internação, sala de cirurgia, etc,) possam ser feitas num consultório médico, sem necessidade de internação.

Levando-se em conta as condições de trabalho do médico, a cirurgia através de laser proporciona menor quantidade de sangue nos tecidos que sofreram incisão. Isto se dá graças à natureza do processo de corte de tecidos por laser: o calor do laser vaporiza de forma localizada a água presente nos tecidos, o que corresponde a 80 a 90% do conteúdo do tecido vivo. Através deste processo, ocorre também o fechamento de pequenos vasos sanguíneos assim como de pequenas ter-



minações nervosas presentes no local da incisão.

Do ponto de vista do paciente, esta espécie de cauterização é bem-vinda pois seu pós-operatório será menos problemático devido à ausência ou grande diminuição de pequenas hemorragias devido ao fechamento de um grande número de pequenos vasos, além de menor dor pelo prévio fechamento de terminações nervosas.

Além de procedimentos cirúrgicos, onde se utilizam basicamente lasers do tipo CO<sub>2</sub>, pode-se utilizar diodos laser na medição da curvatura de tecidos do olho, por exemplo, e diagnósticos de doenças oftalmológicas do tipo glaucoma, etc.

#### IV.6 - Aplicações em Instrumentação

A principal contribuição da optoeletrônica e da fotônica para sistemas de instrumentação são os sensores de fibra óptica. Estes sensores são mais resistentes à corrosão e abrasão, além de serem imunes às interferências eletromagnéticas e possuírem pequenas dimensões.

O princípio de operação destes sensores está ligado às propriedades que as fibras ópticas têm de alterar as características de transmissão da luz que percorre seu interior a partir de estímulos externos. Estes estímulos externos podem alterar a intensidade, a frequência, a polarização ou a fase do sinal luminoso dentro de uma fibra. Cada um destes efeitos pode ser tomado como base para a classificação de famílias de sensores ópticos.

Podemos mudar a intensidade do sinal em uma fibra óptica provocando a saída de alguma luz, ou seja, deformando-a de forma que dela saia uma parte da luz da fibra. Isto por ser obtido, por exemplo, através de um deformador como da figura IV.10, onde algumas microdeformações sejam impostas por pressão à fibra.

Podemos ainda modular o sinal luminoso através de polarização, alterando a orientação da luz. Digamos que um sinal luminoso polarizado seja lançado numa fibra. Este sinal pode ser alterado, por exemplo, por um campo magnético gerado por uma corrente elétrica, provocando sua rotação, ou seja, a mudança de orientação do seu plano de polarização [63]. O grau de rotação, mais tarde processado por um polarizador e um analisador apropriado, indica o nível do campo magnético detectado pela fibra.

A modulação de frequência muda as condições de propagação do sinal luminoso na fibra. Isto pode ser obtido através da mudança do grau de absorção da fibra em determinados comprimentos de onda, mudando, portanto, o perfil de distribuição dos comprimentos de onda transmitidos. Este tipo de sensor raramente é utilizado porque a modulação em frequência geralmente é de difícil detecção.

Os sensores baseados em modulação de fase aproveitam o fato de que uma fibra óptica, quando pressionada num determinado trecho, altera levemente o seu índice de refração, diminuindo a velocidade de propagação da luz dentro da fibra e portanto retardando a sua fase. A mudança do índice de re-

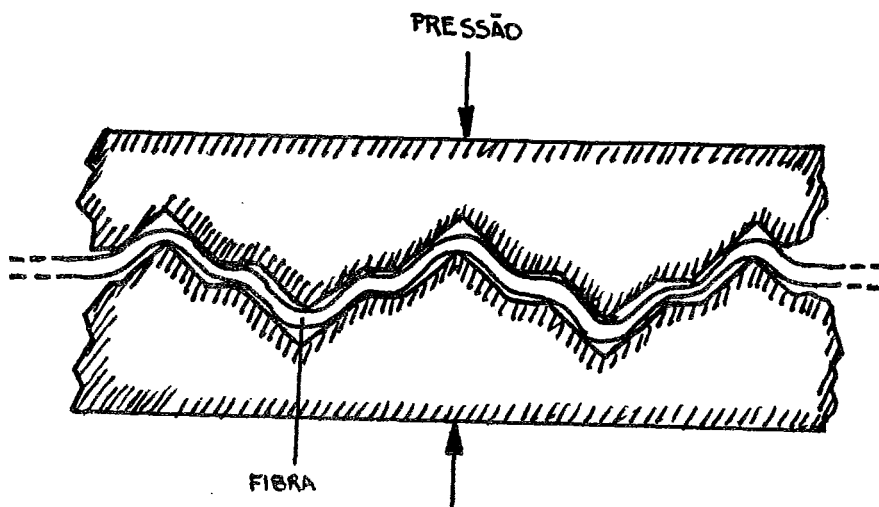


FIGURA IV.10. Transdutor de pressão através de "microbendings" [El. Própria].

fração geralmente é pequeno mas, como a mudança de fase é proporcional ao comprimento da fibra que está sob pressão, podemos ter uma significativa mudança de fase desde que o segmento da fibra sob pressão seja relativamente extenso.

Um sensor de fibra óptica é simplesmente um dispositivo onde um determinado comprimento de fibra modula a intensidade da luz passando em seu interior. Um diodo laser emite a luz numa ponta do sensor enquanto um fotodetector recolhe o sinal modificado na outra ponta. Processando-se este sinal resultante, pode-se medir determinadas grandezas, de pressão e magnetismo, a acidez e aceleração.

Combinando-se estes efeitos podemos medir temperatura, pressão, aceleração, posição, fluxo de líquidos e gases, nível de líquidos em reservatórios, campos magnéticos etc., e até análises químicas, como por exemplo, a medição da concentração de dióxido de carbono em um determinado meio ou a medição de pH, através de um espectrômetro ligado no circuito da fibra[63].

Alguns destes sensores já estão sendo comercializados [64] e espera-se que estes dispositivos tenham larga aplicação em aplicações industriais e militares [63], como por exemplo no caso dos giroscópios ópticos, já citados no item sobre aplicações militares [73].

Um giroscópio mecânico é um instrumento constituído de um corpo simétrico capaz de girar em alta velocidade em torno do seu eixo de simetria e que, quando suspenso apropriadamente, mantém invariável a direção deste eixo pelo princí-

pio de conservação do movimento angular. Assim, giroscópios são utilizados há muito tempo em sistemas de navegação de aeronaves e de foguetes, pois são uma espécie de referência direcional.

Um giroscópio óptico é feito de um pedaço de fibra óptica enrolado como uma bobina e, a ela acoplados um laser e um fotodetector. Este tipo de sensor foi demonstrado pela primeira vez em 1976. A luz do laser é dividida em dois feixes que são direcionados em sentidos contrários na bobina fibra óptica. Estes dois feixes percorrem a bobina, cada uma em um sentido, até emergirem num fotodetector. Se a bobina se mantiver estacionária, não haverá mudança de fase detectável no sinal de saída. Se o giroscópio se mover segundo o plano da bobina, a luz que se propaga num sentido deverá percorrer um caminho diferente do outro feixe de luz. Desta forma o sinal no fotodetector indicará uma ligeira mudança de fase, decorrente da composição de dois sinais iguais chegando em instantes diferentes. A mudança de fase será proporcional ao ângulo de inclinação da bobina, podendo-se detectar deslocamentos angulares muito pequenos [64].

De posse do ângulo de inclinação da bobina um sistema de direcionamento ou navegação poderá fazer as correções de trajetória de um foguete, por exemplo, ou então de um avião comercial.

## CAPÍTULO V - HISTÓRICO DA TECNOLOGIA OPTOELETRÔNICA NO BRASIL

### V.1 - Introdução

Neste capítulo descreve-se a estrutura do setor de optoeletrônica e fotônica no País, procurando-se, sempre que possível, expor uma visão abrangente do processo de implantação de capacitação tecnológica no País tendo em vista os diversos atores presentes: o setor governamental, as universidades, centros de pesquisa e o setor privado. Para facilitar a definição dos diversos agentes atuantes nas diversas áreas de pesquisa, desenvolvimento e comercialização poderíamos montar uma tabela baseada em quadro elaborado pela SEI [74], na próxima página.

TIPO DE COMPONENTE	MATERIAIS	ESCALAS PRODUÇÃO	Custo/Preço	CONFIABILIDADE	APLICAÇÕES
led's, acoplad.	GaAlAs/GaAs GaAsP, GaP	Grande	Baixo	--	Consumo
Lasers, leds, fotodet.	InGaAsP InGaAs/InP	Pequena	Alto	Alta	Comunica- ções ópticas
Lasers de potência	GaAlAs/GaAs	Média	Baixo	--	Militar
Detect. IR	InSb, PbTe, PbSnTe, HgCdTe	Pequena	--	--	Militar e Espacial
Células solares	GaAlAs/GaAs InGaAsP/InP	Pequena	--	Alta	Espacial
Lasers p/ informát. Instrumentação	GaAlAs/GaAs	Grande	Baixo	Alta	Impressor. instrumen- tos, CD-Player
Disposit. Microonda FETS, HEMTS MMICS	GaAs, GaAlAs	Média	Médio	Baixa	Telecomuni- cações, militar
Circuitos digitais optoeletr.	GaAs	Pequena	Alto	Elevada, alto desem- penho	Telecom. alta capa- cidade, supercom- putadores, área milit
Fibras Ópticas	Sílica, SiCl4	Grande	Médio	Elevada	Comunica- ções ópticas, sensores
Circuitos Integrados Ópticos	Li3Nb4	--	--	Elevada, alto desem- penho	Telecom. alta capacidad. supercomp. área milit

TABELA V.1: Componentes Optoeletrônicos e fotônicos e suas principais características mercadológicas.

Ao longo deste capítulo faremos um breve descrição dos diversos atores presentes nesta área, procurando sempre que possível observar a sua inter-relação.

Entretanto, é fundamental descrever as estratégias do governo para estes setores e/ou para setores intimamente relacionados à optoeletrônica e fotônica.

## V.2 - As Políticas para o Complexo Eletrônico

Na medida em que, segundo a orientação deste trabalho, a optoeletrônica e a fotônica constituem trajetórias tecnológicas agregadas ao paradigma da microeletrônica, deve-se levar em conta a implementação das políticas relacionadas ao complexo eletrônico, composto pelos seguintes segmentos [75]:

- microeletrônica;
- informática;
- eletrônica de consumo/entretenimento;
- telecomunicações;
- automação industrial.

O primeiro item, referente ao segmento de microeletrônicos, conforme já exposto anteriormente nesta dissertação, forma base tecnológica de todos os outros segmentos do Complexo Eletrônico e, portanto, determina as taxas de inovação tecnológica da indústria eletrônica como um todo. Podemos dizer que as tecnologias de optoeletrônica e fotônica podem



vir a desempenhar um papel semelhante ao do setor de microeletrônica na medida em que os diversos "trade-offs" relacionados à sua ampla difusão sejam encontrados e que estas tecnologias, atualmente ocupando alguns nichos de mercado anteriormente dominados por tecnologias eletrônicas, passem a exercer posição de destaque em todos os segmentos industriais e de serviços voltados para o tratamento e transmissão de informações.

Evidentemente, quando as diversas posições de mercado e de interação entre tecnologias forem tais que os componentes optoeletrônicos e fotônicos exerçam papel fundamental nos setores acima relacionados, em equilíbrio com as tecnologias eletrônicas de última geração, poderemos dizer que as políticas de governo voltadas para informática, automação industrial, telecomunicações e entretenimento serão de vital importância na determinação de mercados e das demandas para componentes optoeletrônicos e fotônicos no País.

Daí a importância de se obter políticas coerentes para os diversos segmentos ora apresentados e estimular a sinergia dos segmentos constituintes do complexo eletrônico.

Entretanto, não é isto o que acontece atualmente no Brasil. Apesar de citada em planejamento estratégico do Governo Federal [76] a integração política dos diversos segmentos constituintes do complexo eletrônico ainda é um objetivo efetivamente longínquo e de difícil implementação. Isto porque segmentos inteiros foram organizados de forma marcadamente diferente e não existe interesse político para que

suas respectivas políticas sejam profundamente alteradas, especialmente no grupo ligado à Zona Franca de Manaus.

Em relação, particularmente, à informática, a Lei nº 7232 de 29/10/84 (Lei de Informática) estabelece a respectiva política, definindo-lhe os objetivos e os instrumentos de execução. O Plano Nacional de Informática e Automação - PLANIN estabelece a estratégia de ação para a capacitação do País no setor.

A Lei 7232 de 29/10/84 dispõe sobre a Política Nacional de Informática. Esta Lei estabelece princípios, objetivos e diretrizes para a informática, cria o Conselho Nacional de Informática e Automação - CONIN -, dispõe sobre a Secretaria Especial de Informática - SEI, autoriza a criação da Fundação Centro Tecnológico para Informática - CTI e institui o Plano Nacional de Informática e Automação - PLANIN - que estabelece a estratégia de ação para a capacitação tecnológica do País no que se refere à Informática.

A Política Nacional de Informática (PNI) tinha por objetivo a capacitação nacional nas atividades de informática, em proveito do desenvolvimento social, cultural, político, tecnológico e econômico da sociedade brasileira.

Dentre os instrumentos de política nacional de informática, seria interessante ressaltar os seguintes:

- . a institucionalização de normas e padrões de homologação e certificação de qualidade de produtos e serviços de informática;

- . a mobilização e a aplicação coordenadas de recur-

os financeiros públicos, destinados ao fomento das atividades de informática;

- . a formação, o treinamento e o aperfeiçoamento de recursos humanos para o setor;

- . o estabelecimento de programas específicos para o fomento das atividades de informática, pelas instituições financeiras estatais.

A consolidação da capacidade nacional em informática requer contínua redução da dependência tecnológica, tornando recomendável o desenvolvimento do País neste setor. As seguintes diretrizes foram, então, contempladas:

- . domínio do ciclo completo de microeletrônica, seus insumos e bens de capital.

- . consolidação da capacidade nacional de desenvolvimento e produção de computadores, equipamentos periféricos e de integração de sistemas;

- . estabelecimento de capacitação nacional em software, atendendo à crescente demanda do mercado interno, ao mesmo nível do estado da arte em outras partes do mundo;

- . domínio das tecnologias de controle de processos e de automação industrial;

- . domínio das tecnologias de redes de computação e integração de serviços em teleinformática;

Para a tentativa de consolidação destas diretrizes foi instituída uma política de incentivos. Os incentivos governamentais para o setor de microeletrônica estão contidos na

lei nº 7.232 de 29/10/84 e regulamentados pelo decreto nº 92.187 de 20/12/85. A seguir temos os incentivos contidos no decreto para as atividades de desenvolvimento tecnológico, produção de bens e serviços, desenvolvimento de recursos humanos, software, exportação e, finalmente, microeletrônica.

INCENTIVOS PREVISTOS NA LEI Nº 7.232 DE 29/10/84 (ARTIGOS 13 A 15) E REGULAMENTADOS PELO DECRETO Nº 92.181 DE 20/12/85.

INCENTIVO/APLICAÇÃO	DESENV. TECNOLÓGICO	PROD. BENS E SERVIÇOS	DESENV. R.H.	SOFTWARE	MICROELETRÔNICA EXPORTAÇÃO
-dedução de até 200% das despesas em programas próprios ou contratados com terceiros (P&D): limite de 50% do I.R. devido) <sup>1</sup> (R.H.: limite de 15% do I.R. devido)	X		X	X	X
-isenção de I.I. sobre bens destinados ao ativo fixo sem similar nacional	X	X		X	X
-isenção de I.P.I. sobre bens destinados ao ativo fixo importados ou nacionais	X	X		X	X
-isenção de I.D.C. sobre bens relacionados a P&D destinados ao ativo fixo	X	X		X	X
-taxa anual de depreciação de bens destinados ao ativo fixo de 33,33%	X	X		X	X
-redução do lucro tributável em porcentagem equivalente à que a receita bruta da comercialização do "software de relevante interesse para o País" ou bem de microeletrônica representar na receita total da empresa					X
-redução das alíquotas de I.I. e I.P.I., nos caso de importação de:					
a- insumos processados : 75%;					
b- produtos semi-acabados : 50%;					
c- produtos acabados : 25%.					
-redução das alíquotas de I.P.I. para aquisição de ou venda de produtos fabricados no País, sendo:					X

a- aquisição de insumos ou produtos intermediários : 80%;

b- venda de produtos nacionais : 80%.

-redução das alíquotas de I.O.C. vinculadas ao pagamento de:

X

a- insumos processados de origem externa: 75%;

b- produtos semi-acabados de origem externa: 50%;

c- produtos acabados de origem interna:25%.

-----  
\* : a- programas contratados com inst. de ensino ou pesquisa, públicas ou privadas, dedução de até 200%;

b- programa próprio ou contratado com outras empresas nacionais, dedução de até 170%;

c- programa em conjunto com outras empresas, deduções proporcionais à participação de cada empresa.

INCENTIVO/APLICAÇÃO

DESENV. TECNOLÓGICO PROD. BENS E SERVIÇOS DESENV. R.H. SOFTWARE MICROELETRÔNICA EXPORTAÇÃO

-isenção de I.I.,I.P.I. e I.O.C., nos casos de importação sem similar

X

nacional, ou aquisição no mercado interno, de:

a- máquinas, equipamentos, etc., destinados ao ativo fixo;

b- insumos não processados.

-isenção de I.O.C. incidente sobre contratos de transferência de

X

tecnologia

-depreciação em 3 anos

X

-usuários de bens de microeletrônica produzidos por empresas

X

nacionais no País poderão deduzir, para efeito do lucro

tributável pelo I.R., 20% do valor de aquisição destes bens

-isenção do Imposto de Exportação à exportação de bens e serviços

X

de informática

Para dinamizar a produção de hardware, de software e de componentes de microeletrônica, o governo, através dos Decretos 92.181 e 92.187 de 20/12/85, criou vários mecanismos de estímulo para o fortalecimento do setor. Estes incentivos, anteriormente já previstos na Lei 7232/84, incluem o apoio à pesquisa e desenvolvimento (P & D).

Os incentivos específicos para P & D eram os seguintes:

- a) dedução de até 200% no IR dos gastos em P & D;
- b) isenção na importação de bens para P & D;
- c) depreciação acelerada para bens de P & D.

Estes incentivos oferecidos pelo governo atendiam às empresas nacionais no que diz respeito a seu conteúdo, desde que observadas todas as suas características originais, expressas na Lei 7232/84 e nos já mencionados decretos.

A dedução dos gastos, a isenção para importação e a depreciação acelerada sempre foram percebidos como fatores de estímulo à atividade de pesquisa e desenvolvimento.

A partir de 1990 ficaram suspensas as concessões de benefícios fiscais no Brasil, embora a área de informática e microeletrônica esteja contemplada, juntamente com outras áreas de tecnologia de ponta, com a possibilidade de concessão de incentivos fiscais e creditícios [76].

O Brasil, através da Política Nacional de Informática,



obteve níveis de crescimento a taxas médias anuais de 25 a 30% para o setor (acima da média mundial de 17%) [75]. Crítica-se muito, entretanto, a pulverização da oferta, através do número excessivo de fabricantes que, se por um lado possibilitaria maior concorrência pela necessidade de ofertar melhores máquinas a menores preços e boa assistência técnica pós-vendas, por outro lado provocou escalas de produção mais baixas do que o mínimo necessário para obter reduções significativas nos custos de produção.

O setor de bens eletrônicos de consumo tem a sua oferta concentrada basicamente na Zona Franca de Manaus (ZFM), ilha de incentivos fiscais encravada na Região Amazônica, envolvendo a montagem de equipamentos de eletrônica de consumo (TV's, equipamentos de áudio, etc.) a partir de "kits" importados e a montagem deste tipo de equipamento a partir de material de baixo valor agregado fabricado no País e peças mais sofisticadas importadas com alíquota zero na ZFM. Em que pese a quantidade de indústrias instaladas na região da ZFM, a orientação governamental para este segmento foi marcada justamente pela ausência de estímulos ao desenvolvimento tecnológico, priorizando o discurso oficial de desenvolvimento regional em detrimento da coerência da política industrial como um todo.

O segmento de telecomunicações é praticamente monopsonico porque o Governo Federal, através de sua "holding" para comunicações, a Telebrás, responde por cerca de 80% da demanda por equipamentos para comunicações no País. A política

de telecomunicações, elaborada pelo Ministério da Comunicações e atualmente pela Secretaria das Comunicações do Ministério da Infra-estrutura segue diretrizes diversas daquelas adotadas nos segmentos de informática e entretenimento. A utilização do poder de compra da Telebrás é determinante na formação do perfil de empresas fornecedoras de equipamentos, peças e componentes para telecomunicações, através da determinação das tecnologias a serem escolhidas, o número máximo de empresas por linha de produto, procedimentos de divisão de mercado e outras reservas de mercado para produtos preferenciais produzidos com tecnologia do CPqD. A produção de equipamentos de telecomunicações é extremamente regulada pelo Poder Central que determina, inclusive, aonde determinadas empresas poderão instalar seus sistemas ou não, numa espécie de reserva de mercado "geográfica." Existia um estímulo à adoção de estruturas de desenvolvimento e absorção de tecnologia nacional, ao contrário do que acontece com o segmento de eletrônica de consumo.

Assim, as políticas dos segmentos do complexo eletrônico seguiram caminhos distintos, determinados pela atuação conflitante da SUFRAMA, SEI (atual DEPIN) e MINICOM (atual Secretaria de Comunicações).

### V.3. Breve Histórico do Setor de Dispositivos Optoeletrônicos

O setor de dispositivos optoeletrônicos começou agregado ao programa brasileiro de comunicações ópticas, inicia-

do na UNICAMP, em 1971, quando começaram as articulações para o estabelecimento de um grupo de pesquisa em dispositivos optoeletrônicos, o Laboratório de Pesquisa em Dispositivos LPD/UNICAMP. [77]

Em 1972 foi criada a TELEBRÁS, empresa governamental para o sistema de comunicações brasileiro. Mais tarde, em 1976, a Telebrás inaugurou o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - CPqD, em Campinas, onde foi dado início ao programa de desenvolvimento de componentes para comunicações ópticas.

A localização do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da TELEBRÁS em Campinas aparentemente facilitou a interação entre os laboratórios da UNICAMP e a TELEBRÁS.

O direcionamento do programa de desenvolvimento de componentes optoeletrônicos em ambas as instituições levou em conta a proposta de implementação de objetivos bem claros, que eram simbolizados pelo projeto de instalação de uma ligação óptica entre as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo [77]. Evidentemente, naquela época não se pensava em sistemas de 2ª e 3ª gerações (comprimentos de onda de 1,3 e 1,55 micrômetros) e o projeto deste tipo de sistema sofreu algumas alterações perfeitamente naturais ao longo do tempo.

O primeiro teste real aconteceu em 1979. Era a instalação de uma ligação de controle para sistemas elétricos na CPFL, na Cidade de Americana, São Paulo. Pelo que consta, esta ligação funciona até os dias de hoje, mostrando a confiabilidade da instalação deste tipo de sistema, pouco su-

jeito à radiação eletromagnética dos cabos e equipamentos em sua proximidade [77].

Entretanto esta era uma aplicação de comunicações ópticas no setor elétrico e não no de telecomunicações. Isto veio a ocorrer pela primeira vez em 1981, quando foi instalada uma ligação entre as centrais de telefonia de Jacarepaguá e Cidade de Deus, no Rio de Janeiro, com capacidade para 480 ligações simultâneas. Este foi o primeiro grande teste de campo no setor de telecomunicações ópticas no Brasil e as experiências resultantes deste teste geraram uma série de aperfeiçoamentos que foram utilizados no desenvolvimento de novos componentes e sistemas. Passou-se também a transferir esta tecnologia de sistemas, gerada no Brasil, para empresas como Elebra Telecom, NEC do Brasil, ABC Teletra (atualmente ABC Teleinformática) e Multitel (Telemulti), além de tecnologia de fibras ópticas, utilizada pela ABC XTAL Microeletrônica e também a de lasers e fotodetectores, para a Elebra Microeletrônica.

Desde lá, a utilização de sistemas baseados em fibras ópticas aumentou consideravelmente no País, sendo que, pelo menos no Rio de Janeiro e São Paulo, boa parte dos enlaces de telecomunicações de grande capacidade já é suprido por Fibras ópticas. Na figura V.1 temos o anel óptico do Rio de Janeiro, composto por sistemas de cabos com fibras multimodo e monomodo.

Além disto, o CPqD vem desenvolvendo pesquisas que o colocam no estado da arte mundial em tecnologia optoeletrô-

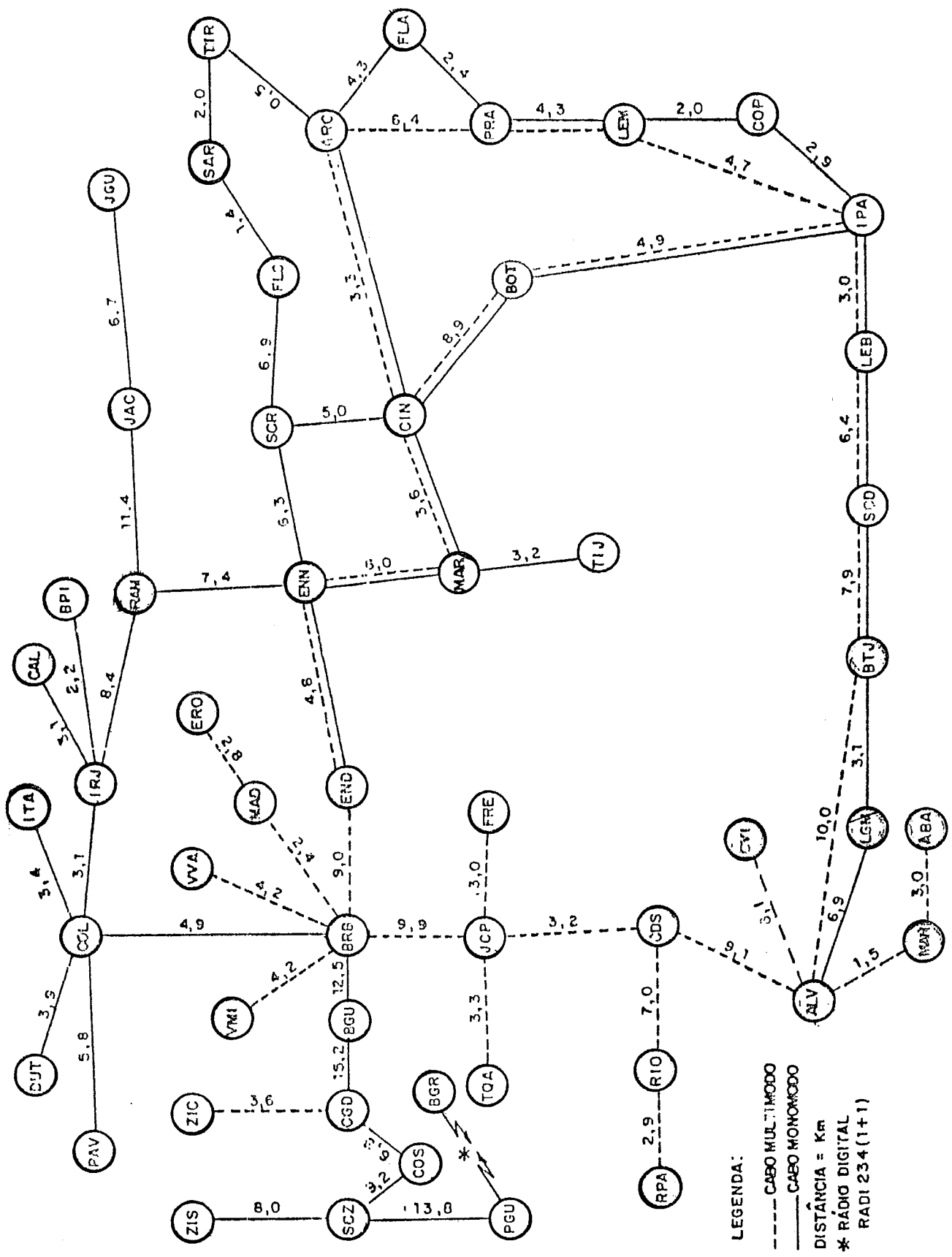


Figura U.1 - Anel óptico do Rio de Janeiro.

nica, com lasers DFB para sistemas de terceira geração [78][79][80][81][82][83], fibras monomodo, fibras birefringentes e fibras polarizadas, além de equipamentos de emenda de fibras [74], fazendo com que o Brasil mereça citações na literatura internacional [84]. O estágio tecnológico do CPqD colocam-no no um dos mais respeitados centros de pesquisa no mundo [85].

Além do mercado de telecomunicações, existe também a demanda por sistemas de comunicações no setor ferroviário (a Cia. Vale do Rio Doce instalou um sistema de comunicação baseado em fibras ópticas de 170 km de extensão na Ferrovia Vitória-Minas, com previsões de expansão para toda a rede de estações), no setor de exploração de petróleo (a Petrobrás já comprou diversos sistemas para a interligação de plataformas marítimas de exploração de petróleo em Campos, planejando ainda uma extensão para o continente) e no setor de geração e transmissão de energia elétrica (a Eletrobrás vem adotando a tecnologia de sistemas ópticos de comunicações, sistemas de controle e sistemas de medidas baseados em sensores desenvolvidos no CEPEL).

#### V.4. Atividades de P&D em Universidades e Centros de Pesquisa

A maior parte das atividades de P&D em optoeletrônica e fotônica são efetuadas em centros de pesquisa governamentais, como o CPqD, CTI e INPE. Além destes, existem diversas universidades com atividades na área, dentre elas a UNICAMP,

PUC/RJ, USP e UFPE.

Pode-se observar a predominância de pesquisa e desenvolvimento de aplicações e de componentes considerados estratégicos nas áreas de telecomunicações, militares e espaciais[74]. Note-se que estas áreas são consideradas grandes demandantes de inovações tecnológicas em todo o mundo, justificando, portanto, a tendência existente no País.

As atividades existentes podem ser divididas em três grandes campos de atuação:

1. Materiais;
2. Dispositivos;
3. Aplicações.

No primeiro caso, existe a pesquisa envolvendo o processamento básico, a preparação, métodos de crescimento epitaxial e caracterização das propriedades físicas e elétricas dos materiais, geralmente semicondutores compostos binários, terciários e quaternários, do tipo GaAs, GaAlAs e InGaAlAs, muito utilizados em dispositivos optoeletrônicos, além dos diversos compostos baseados em silício, como o óxido de silício para utilização em fibras ópticas, com diferentes tipos de dopagem de fibras visando modificar suas características de propagação. O CpqD e o ITA tem programas de pesquisa voltados para a caracterização de materiais adequados à utilização em dispositivos fotônicos como niobato de lítio (LiNbO<sub>3</sub>), por exemplo.

As pesquisas em dispositivos abrangem pesquisas em torno dos tipos de processamento necessário para a fabrica-

ção de determinados dispositivos optoeletrônicos e fotônicos, além da sua fabricação propriamente dita. As atividades de pesquisa nesta área abrangem ainda o modelamento de dispositivos, ou seja, o entendimento físico e matemático do funcionamento dos componentes visando o estabelecimento de teorias e práticas de simulação de seu funcionamento, visando a otimização de seu desempenho.

A área de aplicações diz respeito à pesquisa e desenvolvimento de equipamentos e sistemas que utilizem tecnologias optoeletrônicas.

A tabela abaixo, parcialmente baseada em documento da SEI [74], procura ilustrar as atribuições de cada universidade e centro de pesquisa da área (o que não quer dizer que as universidades tenham programas integrados de pesquisa).



ENTIDADES	MATERIAIS	DISPOSITIVOS	APLICAÇÕES
CPqD/TELEBRÁS	X	X	X
INPE	X	X	X
CTI		X	X
CTA			X
CETEC	X		
CEPEL			X
UNICAMP - IF	X	X	X
PUC/RJ	X	X	X
COPPE/METALURGIA	X	X	
IFQ/USP/S. CARLOS	X		
LME/USP		X	
UFPE	X		

TABELA V.2: Entidades de P&D com atividades em dispositivos optoeletrônicos e fotônicos.

Dentre os centros de pesquisa, talvez o CPqD da TELEBRÁS seja o de maior importância, tanto pelas pesquisas lá desenvolvidas como pelo impacto dos componentes e sistemas lá projetados na qualidade dos serviços de comunicações no País. O CPqD desenvolve, na área de optoeletrônica, lasers semicondutores, fibras ópticas e começa a pesquisar circuitos integrados optoeletrônicos. Note-se que o CPqD tem atividades de pesquisa e desenvolvimento verticalizadas, com pesquisas em materiais, dispositivos e equipamentos.

O INPE desenvolve atividades voltadas para a implementação de sistemas de detecção na faixa infra-vermelha do espectro, tendo também atividades de pesquisa em materiais, dispositivos e equipamentos.

O Instituto de Microeletrônica do CTI, através de seu Laboratório de Mostradores de Cristais Líquidos, desenvolve atividades na elaboração destes dispositivos, assim como de equipamentos e sistemas ligados a este tipo de componente [89][90].

O Centro Tecnológico da Aeronáutica desenvolve sistemas optoeletrônicos para a utilização em radares de alto desempenho além de giroscópios sensores. O CETEC, Centro de Tecnológico de Minas Gerais, desenvolve tecnologias para a obtenção de materiais para a fabricação de fibras ópticas como  $\text{SiCl}_4$ , além de caracterização do quartzo. O CEPEL desenvolve sensores baseados em fibras ópticas para monitoração de alguns parâmetros físicos da transmissão de energia elétrica.

A UNICAMP, através do seu Laboratório de Pesquisa em Dispositivos, do Instituto de Física, foi a pioneira na formação de recursos humanos e especialistas na área de optoeletrônica, especialistas estes que acabaram por gerar "combustível" para as atividades dos centros de pesquisa localizados na região, como o CPqD e o CTI. Note-se que a UNICAMP tem pesquisas em materiais, dispositivos e equipamentos, assim como o CPqD. Isto se deve ao fato de que a TELEBRÁS mantém contratos de pesquisa e desenvolvimento com a UNICAMP,

sendo que, se a UNICAMP faz pesquisa básica, o CPqD transforma as informações tecnológicas advindas da UNICAMP em processos e tecnologias passíveis de serem transferidas para a indústria.

A Pontifícia Universidade Católica do Rio, a PUC/RJ, através do CETUC (Centro de Telecomunicações) e o Instituto de Física também mantém um grupo de pesquisas em dispositivos optoeletrônicos e fotônicos. As suas atividades englobam a pesquisa e caracterização de materiais semicondutores, extremamente facilitada pela recente instalação de equipamento de MOVPE ("metal-organic vapor phase epitaxy"), que possibilitará o crescimento preciso de camadas de semicondutores compostos binários, terciários e quaternários. Além disto, a PUC/RJ trabalha na caracterização de efeitos não lineares de propagação em fibras ópticas e no desenvolvimento de sistemas de sensoriamento remoto e comunicações submarinas através do CENPES-PETROBRÁS. A utilização do reator de MOVPE poderá possibilitar, por exemplo, a deposição de super-redes de semicondutores, a base de funcionamento de dispositivos como o SEED, descrito no capítulo sobre tecnologia.

A COPPE Metalurgia, através de seu Laboratório Auger, mantém pesquisas em materiais e desenvolve dispositivos de silício amorfo, principalmente células solares.

Na USP de São Carlos existem pesquisas na áreas de materiais semicondutores compostos para sensores, óptica de filmes finos etc. O Laboratório da Microeletrônica da USP, segundo a SEI, mantém relacionamento na área de semiconduto-

res compostos com o CPqD da TELEBRÁS através de contratos de pesquisa, assim como a UNICAMP. Entretanto, a LME/USP desenvolve atividades apenas na pesquisa de dispositivos. A UFMG desenvolve pesquisas em sensores e componentes III-V [74].

No Departamento de Física de Universidade Federal de Pernambuco desenvolvem-se pesquisas sobre efeitos ópticos não lineares, a base para o desenvolvimento de dispositivos de chaveamento óptico.

#### V.5. Cenário Presente

O setor de optoeletrônicos no País resume-se praticamente às atividades oriundas de recursos governamentais, seja na área acadêmica, de pesquisa ou empresarial.

Isto se deve à característica do segmento de telecomunicações no País, fortemente dependente da presença do Estado, conforme explicado anteriormente. Assim quase todos os esforços para a geração de tecnologia no segmento, além da comercialização de componentes optoeletrônicos, está intimamente ligado ao setor estatal, principalmente da Telebrás e empresas associadas.

##### V.5.1. Dispositivos Semicondutores Compostos

O mercado de dispositivos compostos (lasers e LED's) para telecomunicações no Brasil está inserido dentro do mercado de equipamentos voltados para a implementação de comunicações de longa e média distância, como troncos ópticos entre estações telefônicas e de comutação de dados dentro de

grandes cidades e/ou entre metrópoles. A estimativa deste mercado, segundo a SEI [74], seria:

---

DISPOSITIVOS	ANOS E QUANTIDADES (UNIDADES)			
	1989	1990	1991	1992
LASER 0,85	600	300	300	300
LED 0,85	300	300	300	300
LASER 1,3 MONOMODO	900	1100	1300	1300
LED 1,3 MONOMODO	200	500	600	700

---

TABELA V.3 Estimativa para o mercado de dispositivos semi-condutores compostos para telecomunicações.

A ausência de investimentos governamentais em infraestrutura de telecomunicações, além da recessão econômica nos anos de 1990 e 1991, certamente diminuiu de forma acentuada a demanda por este tipo de componentes, de forma que é possível afirmar que a estimativa da SEI para aqueles anos pode ser reduzida em cerca de 40%.

A única empresa nacional com planos de implantação do ciclo completo de fabricação de dispositivos optoeletrônicos é a AsGa Microeletrônica, sediada em Paulínia, São Paulo. Atualmente a AsGa importa os dispositivos, testando e marcando-os para posterior comercialização. Instalada em uma

casa pré-fabricada de apenas um pavimento, a empresa começou em 1991 a construção de sua sede definitiva em alvenaria.

A equipe técnica da AsGa tem no CPqD da Telebrás, distante alguns quilômetros da sede da empresa, um local de treinamento e especialização, conforme contrato firmado entre a empresa e a TELEBRÁS. Assim, na época de nossa visita às instalações da AsGa, pelo menos três engenheiros da empresa cumpriam programa de treinamento no CPqD.

A história desta empresa se inicia na Elebra Microeletrônica, empresa do grupo Docas. A Elebra Microeletrônica fazia montagem de componentes microeletrônicos de silício e chegou a elaborar um projeto de uma fábrica de circuitos integrados projetada pelo engenheiro Len Mei, de larga experiência na área. Esta fábrica, de concepção flexível, poderia ser utilizada na fabricação de componentes de várias tecnologias. Pelo fato de manter atividades em setores como teleinformática, e sendo fabricante de equipamentos de telecomunicações como as centrais Trópico, desenvolvidas no CPqD, o grupo Elebra considerou razoável a criação de um departamento interno à subsidiária Elebra Microeletrônica para atuar em componentes optoeletrônicos. Entretanto, houve a decisão do grupo Elebra se dedicar a segmentos de maior volume de vendas e rentabilidade como telecomunicações e informática, e, portanto, desfazendo de sua subsidiária de microeletrônica, vendida para o grupo Itaú. Entretanto a divisão de optoeletrônica da Elebra Componentes teve continuação sob forma de um empreendimento de menor porte e maior leveza

gerencial, ocupando o lugar que antes pertencia à Elebra Microeletrônica na área de componentes optoeletrônicos para comunicações. A maioria dos contratos de fornecimento de componentes para a TELEBRÁS, compromissos de fornecimento foram transferidos para a AsGa Microeletrônica, assim como foram Asga assumiu os incentivos aprovados pelo CONIN e que eram anteriormente dedicados à Elebra. Na época a equipe da Elebra era contituída por cerca de 22 pessoas, sendo que a esta equipe seria agregada uma pequena equipe administrativa. Na época, os principais pontos de convencimento junto ao público externo (agentes de decisão em diversas instituições) para a concretização da operação de criação da AsGa a partir da divisão de optoeletrônica da Elebra eram:

- a competência técnica;
- o monopólio de mercado, graças ao fato da equipe ter atingido um grau de nacionalização (montagem, teste e marcação) e ter bom relacionamento com os principais clientes, inclusive competidores da Elebra como NEC e ABC Teleinformática;
- a existência de contrato de fornecimento de tecnologia pelo CPqD;
- a existência de contrato de financiamento com a FINEP com a Elebra, que teve que ser negociado;
- um contrato com a General Optronics para o fornecimento de dispositivos, partes e peças.

Assim, logo que a decisão da Elebra de abandonar o negócio foi tomada, começaram a ser tomadas algumas ações no

sentido de viabilizar a operação:

- um planejamento dos negócios da empresa, histórico de atuação (no caso a Elebra), mercado e planejamento financeiro;

- "lobby" junto ao CPqD, FINEP, SEI e CONIN para manutenção de contratos e incentivos anteriormente pertencentes à Elebra;

- contatos junto a financiadores em potencial, com o objetivo de obter recursos de cerca de 2,5 milhões de dólares, via FINEP ou via sócio capitalista.

A AsGa conseguiu sua viabilização graças à entrada de um sócio capitalista e de financiamento no BNDES e FINEP. O seu principal fornecedor externo é a empresa Laser Diode, dos E.U.A..

Na visão do diretor da AsGa, a continuidade do programa de colaboração com o CPqD é fundamental para a continuidade das atividades de capacitação de seu corpo técnico. Além disto, a AsGa tem contrato de exclusividade de fornecimento de componentes optoeletrônicos para a TELEBRÁS. Apesar disto, a empresa prefere trabalhar, segundo seu diretor, em regime de livre concorrência.

#### V.5.2. Fibras Ópticas

Na área de fibras ópticas existem duas empresas operando com o ciclo completo: a ABC XTAL Microeletrônica de Campinas (que também tem uma fábrica no Rio onde cresce, testa e monta cristais osciladores) e a BRACEL.



A tecnologia utilizada pela XTAL foi desenvolvida no CPqD, que fica a alguns metros da empresa. Além da ABC XTAL temos uma empresa com projeto aprovado na antiga SEI para a instalação de planta para fabricação de fibras ópticas: a BRACEL, empresa que está com toda a sua fábrica montada e que pode efetuar a cablagem das fibras também.

As empresas produtoras de fibras ópticas no Brasil tem dois principais problemas para sua atuação no País: o primeiro é a qualidade da fibra fabricada aqui e o segundo é a importação ocorrida em 1988 de uma grande quantidade de fibras ópticas pelo Ministério das Comunicações. No primeiro caso, o da qualidade, do ponto de vista das empresa que fazem a cablagem, ou seja, colocam as fibras num cabo óptico, é a baixa resistência mecânica da fibra brasileira relativamente ao similar importado. Embora este problema já tenha sido minorado, inclusive através de inovações no maquinário de controle de qualidade e caracterização [85], ainda existem restrições, por parte da indústria de cabos, à utilização de fibras nacionais. Além disto, o perfil de dispersão das fibras fabricadas no Brasil não está no padrão internacional, segundo alguns especialistas entrevistados durante a elaboração desta dissertação.

O segundo problemas diz respeito à importação de uma grande quantidade de fibras ópticas da Philips, por parte do governo brasileiro, em 1988 e 1989, destinada a sanar problemas de abastecimento de mercado existentes à época. A capacidade industrial instalada para a fabricação de fibras

ópticas para todo o País era determinada pela ABC XTAL, pois a empresa tinha contrato de exclusividade no fornecimento de fibras para a TELEBRÁS, vigente até agosto de 1989, além de ser o único fabricante. A demanda por fibras ópticas chegou a um ponto tal que a capacidade de produção da empresa não era suficiente para suprir o mercado, ocasionando atrasos nos cronogramas de instalação de novos sistemas pela TELEBRÁS. No início de suas operações, em 1984, a ABC XTAL tinha uma previsão de produção de cerca de 2.000 km de fibras em 12 meses, ou seja, no período entre agosto de 1984 e agosto de 1985. No segundo semestre de 1985, os pedidos de compra de seis meses já atingiam os 2.000 km estipulados como teto de produção anual. Previsões posteriores indicaram a demanda por 30.000 km anuais. Em 1989 já se esperava uma demanda de 67.000 km, muito acima da capacidade de produção da empresa. Naquela época o Ministério das Comunicações autorizou a importação de um lote de fibras ópticas que serviria como regulador da oferta, e que permitiria a implantação de diversos projetos na área. O problema é que, com a redução da demanda ocasionada pela falta de investimentos no setor de comunicações, a quantidade de fibra importada está servindo a miguada demanda existente por pelo menos 2 anos, tempo suficiente para levar empresas como a ABC XTAL e a BRACEL a um regime forçado de baixo volume de vendas. Como se sabe, estas empresas utilizam tecnologia gerada pelo CPqD da TELEBRÁS.

A entrada da BRACEL no mercado, juntamente com a reso-

lução do CONIN liberando a importação de fibras ópticas e com a baixa capacidade de investimentos da TELEBRÁS certamente está provocando uma disputa acirrada no mercado. A capacidade instalada da BRACEL está em torno de 50.000 km por ano, em três turnos [85]. A ABC XTAL tem como meta atingir a capacidade de 55.000 km por ano em 1991. Por outro lado ambos os fabricantes concordam em prever a demanda efetiva por fibras ópticas em algo em torno de 30.000 km por ano, enquanto que as necessidades reais do sistema indicam uma demanda de 60.000 km por ano, reprimida pela ausência de investimentos governamentais.

Entretanto, considerando-se o médio prazo, a previsão de mercado para fibras ópticas para os próximos dez anos é de crescimento significativo na medida em que sejam retomados os investimentos em infra-estrutura e sejam abertos novos mercados como a instalação de fibras para o assinante ("local loop")[100][101], além da utilização de cabos ópticos em substituição aos cabos coaxiais em comunicações de dados, redes de computadores, sistemas de controle remoto, etc. Este tipo de diversificação pode ser fundamental para qualquer empresa fornecedora de uma grande grupo como a TELEBRÁS, que pode vir a ser responsável por quase todo o faturamento de empresas como a ABC XTAL e a BRACEL.

V.5.3. Dispositivos de Cristal Líquido.

O mercado de dispositivos de cristal líquido estimado pela SEI para os anos de 1986 e 1987 está na tabela abaixo:

---

MERCADO	1986	1987
Z.F.M.	3,22	1,33
OUTRAS REGIÕES	0,55	0,47
TOTAL	3,77	1,8

---

TABELA V.4: Estimativa do mercado nacional de dispositivos de cristal líquido em US\$ milhões F.O.B.

Aqui deve-se fazer uma ressalva: os valores apresentados pela SEI para o mercado de displays de cristal líquido diferem radicalmente de algumas previsões de mercado apresentadas por uma empresa que está entrando na área. Segundo esta empresa, o mercado nacional no ano de 1988 estaria em torno de US\$ 40 milhões, incluindo aí 40% de importações ilegais, ou seja, contrabando. Assim o mercado legal para estes dispositivos estaria avaliado em torno de US\$ 24 milhões em 1988, valor não compatível com os dados da SEI [89].

Duas empresas estão a investir no setor de cristais líquidos: a Alfatronic/Alfacom e a Moddata. Nos dois casos a tecnologia empregada é de origem externa, através de duas

etapas: na primeira, importam-se os componentes e comercializam-nos aqui. Numa segunda etapa, efetua-se a nacionalização. Nas duas etapas equipes de engenheiros e técnicos deverão receber treinamento específico para a absorção da tecnologia. Ambas as empresas mantêm relacionamento com o Instituto de Microeletrônica do CTI, onde existe um programa para o desenvolvimento de displays de cristal líquido TN ("twisted nematic"). No caso da Moddata a fonte de tecnologia é a Seiko/Epson e no caso da Alfatronic/Alfacom a tecnologia provém da Varitronix [89]. Para implementar sua estratégia na área de LCD's, dentre outras decisões a Moddata comprou em 1989 a Engesa Eletrônica, em São José dos Campos, São Paulo, onde desenvolverá sua unidade industrial.

#### V.5.4. Outras Iniciativas

Outras empresas empregam componentes optoeletrônicos em suas linhas de produtos, como a ICOTRON (Philips), Newtronic Tecnologia, MC Microcircuitos, Politronic e Rohm, fabricando desde displays de LED's até chaves optoeletrônicas, limitando-se, entretanto, aos procedimentos de montagem e teste, sem planos de englobarem outras etapas mais complexas do ciclo produtivo, como projeto e fabricação dos dispositivos semicondutores. Provavelmente a única exceção é a Newtronic, que pretende absorver tecnologia do CTI.

A estimativa do mercado nacional para este tipo de componentes está na tabela V.5 abaixo:

MERCADO	1986	1987	1988	1989	1990
IMPORTAÇÃO PELA Z.F.M.	5,7	6,7	6,0	6,5	5,5
IMPORTAÇÃO OUTRAS REGIÕES	7,8	9,9	8,7	9,3	7,6
PRODUÇÃO NACIONAL	6,1	10,2	9,0	9,7	8,2
TOTAL	19,6	26,8	23,7	25,5	21,3

TABELA V.5: Dispositivos não especializados de semicondutores compostos. Valores em US\$ milhões F.O.B.

Fonte: [74] até 1987; 1988 em diante elaboração própria.

Note-se o tamanho do mercado na Zona Franca de Manaus, correspondente a cerca de 25% de todo o mercado nacional. A maior parte da produção deste tipo de dispositivos refere-se a displays de LED's e mostradores a LED para utilização em equipamentos de eletrônica de entretenimento, automotiva e similares (em 1986, US\$ 8 milhões referentes a LED's e US\$ 6,1 milhões referentes a mostradores de LED's, segundo a SEI/DEPIN [74]).

## CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES

Pudemos observar, ao longo desta dissertação, uma parte do enorme universo das tecnologias agregadas ao paradigma da informação/microeletrônica. Podemos especular quando todas as tecnologias aqui apresentadas ou sugeridas farão parte de nossa vida cotidiana. Na realidade muitas vezes isto já acontece, num grau que, podemos dizer, é ainda incipiente frente a toda a gama de aplicações divisadas a partir da utilização do conceito da luz como mensageira de informações, servindo à arte e à técnica, se prestando à violência da guerra e à promoção da vida, possibilitando melhor comunicação entre pessoas e a melhoria da qualidade de vida.

Inicialmente, no Capítulo II, mostramos uma grande trajetória tecnológica agregada ao paradigma da informação: a microeletrônica, que na realidade as vezes se confunde com o próprio paradigma. Neste caso o paradigma é o conjunto de tecnologias microeletrônicas ligadas à informatização da sociedade, atualmente calcada em componentes como chips eletrônicos. Entretanto, como vimos, existe uma crescente tendência à utilização de tecnologias mais novas e de caráter inovador mais radical que a eletrônica, como a optoeletrônica e a fotônica, duas trajetórias tecnológicas também agregadas ao paradigma da informação. A trajetória mais indentificada com o paradigma tecnológico atual é a da microeletrônica, em constante evolução. As outras trajetórias, também em constante evolução, embora em sua maioria em plano secun-

dário devido à baixa difusão das tecnologias a si agregadas, são a optoeletrônica e a fotônica.

No Capítulo III procuramos apresentar alguns dos componentes básicos das tecnologias optoeletrônicas, tais como lasers, fotodetectores, circuitos integrados optoeletrônicos, etc. Pudemos notar, através desta abordagem predominantemente técnica, o grau de evolução das tecnologias voltadas para o processamento de sinais luminosos dentro do contexto dos componentes e dispositivos voltados para a geração, detecção e processamento de informações.

No Capítulo IV apresentamos diversas aplicações das tecnologias optoeletrônicas e fotônicas, deixando claro que a optoeletrônica e fotônica têm capacidade de difusão em quase todos os setores intimamente ligados ao processamento de informações como telecomunicações, informática, aplicações militares, etc. Não podemos esquecer setores como os de eletrônica de entretenimento, que cada vez mais utiliza tecnologias optoeletrônicas, e os setores de instrumentação e equipamentos médicos, que também estão sujeitos à maior difusão destas tecnologias.

No Capítulo V procuramos mostrar qual a capacitação brasileira nestas áreas, mostrando o grau de dependência destes setores em relação aos investimentos governamentais, os conhecimentos gerados nas universidades e centros de pesquisa e as iniciativas oriundas do setor privado.

Segundo os dados e teorias apresentadas ao longo desta dissertação, podemos inferir algumas conclusões que levem à



melhor compreensão dos fenômenos relacionados à evolução e difusão tecnológicas no caso específico das tecnologias aqui abordadas.

#### VI.1 - Trajetória da Optoeletrônica e Fotônica versus Microeletrônica

No que se refere à compreensão das trajetórias tecnológicas envolvidas, podemos notar que a trajetória tecnológica associada às tecnologias optoeletrônicas encontra-se num estado intermediário de proximidade do paradigma tecnológico principal, entre as trajetórias da microeletrônica (bem identificada com o paradigma, por sua maior maturidade) e da fotônica (ainda a ser plenamente difundida e amadurecida tecnicamente).

Poderíamos, para simplificar a compreensão deste quadro, traçar uma analogia entre o comportamento das diversas trajetórias ligadas ao paradigma da informação e um redemoinho, ou um vórtex, onde várias trajetórias se movem em torno de um padrão tecnológico mais abrangente (a manipulação de informações) segundo seus graus de maior ou menor difusão: a microeletrônica bem no centro do vórtex, no seu eixo central e girando a alta velocidade, seguida pela optoeletrônica, um pouco mais afastada do centro do redemoinho e com velocidade de giro menos acentuada, e depois, mais afastada do centro, embora engajada no movimento helicoidal, a fotônica. A falsa alternância destas "correntes de vento", como num redemoinho, proporciona a substituição de uma trajetória por outra

ou, pelo menos, a coexistência de mais de uma trajetória num mesmo ponto de evolução, em equidade de condições tecnológicas e de disseminação. Desta forma, duas ou mais trajetórias podem se complementar, dependendo dos nichos específicos que elas atingirão. É difícil prever, neste ponto, se a transição de uma trajetória para outra é definitiva, e provavelmente radical, ou apenas provisória, sendo o cenário constituído pela alternância entre uma trajetória e outra. A partir desta possível alternância podemos prever diversas opções de difusão e evolução tecnológicas. Num cenário hipotético "1" pode acontecer que a optoeletrônica alcance um nível de difusão tal que a maior parte do mercado seja ocupado por tecnologias e produtos advindos da interação entre luz e elétrons, e que a microeletrônica como a conhecemos hoje ocupe uma faixa menor no panorama tecnológico. Já num outro cenário hipotético "2" pode acontecer que as tentativas de resolução dos "trade-offs" associados às tecnologias optoeletrônicas dêem resultados insatisfatórios frente à evolução tecnológica contínua das tecnologias microeletrônicas tradicionais. Neste caso, as tecnologias optoeletrônicas continuariam a ocupar um posto periférico no mercado de produtos voltados para a manipulação de informações. A partir da opção entre um ou outro cenário são contruídas as políticas tecnológicas nacionais ou empresariais.

É bom lembrar que este tipo de previsões devem estar sempre relacionadas aos conceitos de lógica e previsibilidade de sistemas tecnológicos, conforme explicamos no Capítulo

II. Portanto, estas previsões sempre estão ligadas à tentativas de obtenção dos objetivos do paradigma a que pertencem, ou seja, maior rapidez de operação e menor tamanho, aumentando a densidade funcional dos componentes e sistemas. Caso a optoeletrônica e a fotônica logrem obter sucesso com o atingimento destes objetivos, com vantagem em relação às tecnologias eletrônicas, podemos dizer que as tecnologias ópticas estarão representado o papel de insumo-chave do paradigma tecnológico, assim como acontece com a microeletrônica atualmente.

Levando-se em conta os diversos critérios de evolução e difusão tecnológica podemos distinguir claramente alguns aspectos fundamentais:

- a difusão da utilização de componentes optoeletrônicos ativos (lasers e fotodetectores, etc) e passivos (fibras ópticas, por exemplo) tem se dado de maneira acelerada pela redução dos custos de fabricação destes componentes, sua crescente eficiência e a disseminação de sistemas de comunicações ópticas.

- a clara definição de uma trajetória tecnológica agregada ao paradigma microeletrônico e em constante interação com os setores tradicionalmente associados à indústria eletrônica. Como exemplo podemos citar as evoluções associadas à substituição de monitores baseados em tubos de raios catódicos por outras tecnologias como displays de cristal líquido, plasma gasoso e outras (o que até certo ponto pode ser considerado como uma evolução restrita ao universo ele-

trônico mas que, pelos padrões adotados nesta dissertação, está contida no universo da optoeletrônica). Outro exemplo claro é substituição de comunicações elétricas de baixa voltagem/corrente (equipamentos eletrônicos de áudio, interfaces entre computadores) por sinais ópticos em fibras. A gradual evolução das tecnologias de armazenamento óptico (cd-rom, worm, magneto-óptica, mudança de fase) caminha complementarmente às tecnologias de armazenamento em meio magnético.

A disseminação da optoeletrônica e da fotônica tende, portanto, a ocupar nichos de mercado na medida em que a utilização da eletrônica limite ou impossibilite o alcance de determinados objetivos de desenvolvimento e projeto.

Desta forma, podemos concluir que, na medida em que as evidências indicam que a utilização de luz está aumentando a rapidez e confiabilidade dos sistemas de informação, principalmente em telecomunicações, é provável que a optoeletrônica sofra um processo de difusão acelerada devido à evolução dos sistemas de comunicações por fibras ópticas. Uma condição básica para que isto ocorra é a adoção das fibras ópticas a nível de rede de assinantes dos serviços de telefonia. Será cada vez maior o número de serviços e equipamentos desenvolvidos para aproveitar o novo patamar de densidade e velocidade de informações. Torna-se factível, portanto, a utilização em larga escala de circuitos integrados optoeletrônicos monolíticos, ou seja, feitos num mesmo substrato. Este tipo de dispositivo, já existente no merca-

do, pode ter aplicação em sistemas computacionais, televisões, telefones etc.. Tudo depende da evolução das tecnologias de integração de sistemas optoeletrônicos em semicondutores compostos.

A integração de dispositivos fotônicos, por outro lado, é uma etapa mais distante na evolução tecnológica do paradigma da informação. Evidentemente esta é a trajetória tecnológica que promete as mais radicais inovações devido ao aproveitamento quase total das características físicas de propagação da luz. No setor de computação, por exemplo, o impacto da implementação de novas arquiteturas aproveitando as propriedades de materiais eletro-ópticos, magneto-ópticos e acustico-ópticos pode ser tão radical que implicaria na mudança dos conceitos computacionais mais básicos, ou melhor, na descoberta de que podem existir vários modos de se "computar" informações de diferentes tipos, utilizando-se redes neuronais [91][92][93][107], holografia [36], óptica integrada [94][95][96][97] etc. [42][109].

## VI.2. Cenários Previsíveis

Por estes e outros motivos expostos aqui, podemos correr o risco de cair no óbvio tecendo recomendações como: o Brasil deve dar a máxima prioridade na ampliação dos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento aqui existentes, aproveitando que as barreiras de entrada neste mercado, assim como as dificuldades para o desenvolvimento de tecnologias nesta área, ainda são relativamente fracas em comparação com o

universo da tecnologia microeletrônica. Mas, neste caso, o mais sábio é o óbvio.

No entanto, seria interessante considerar alguns cenários que podem ocorrer, dependendo das políticas adotadas em relação às tecnologias optoeletrônica e fotônica.

Um primeiro cenário, a nosso ver positivo, seria dos investimentos maciços em ciência, tecnologia e educação, com alguns pontos básicos:

- a utilização efetiva do poder de compra do Estado;
- o incentivo ao desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem saltos tecnológicos em relação a produtos e processos tradicionais;
- a isenção de impostos de importação para as atividades de P&D;
- a facilitação na obtenção de financiamentos para compra de equipamentos no exterior, desde que destinados a pesquisa e desenvolvimento de componentes e processos de alta tecnologia;
- a diminuição ou a isenção das quotas de importação para equipamentos e insumos necessários ao desenvolvimento tecnológico nas universidades e centros de pesquisa e nas empresas com projetos de desenvolvimento aprovados por agências governamentais de fomento;
- a estabelecimento de incentivos fiscais e creditícios para a indústria nacional, favorecendo atividades para a melhoria de processos fabris e exploração de novas tecnologias de fabricação;

- a melhoria nos processos burocráticos de obtenção de financiamentos junto à FINEP;

- a melhoria dos processos de acompanhamento de investimentos e financiamentos obtidos juntos às agências de fomento governamental;

Talvez mais importante que a implementação de alguns destes itens seja a manutenção dos compromissos governamentais de fomento à pesquisa e desenvolvimento tecnológico em empresas, universidades e centros de pesquisa. A melhor maneira de implementar esta receita é, uma vez definidos os objetivos de desenvolvimento tecnológico, cumprir prazos para a obtenção de financiamentos, garantir a homogeneidade do fluxo de recursos para universidades, centros de pesquisa e empresas, garantir os prazos de salvaguarda de mercado para a indústria, através de restrições à importação de peças e componentes considerados como prioritários numa estratégia mais ampla de desenvolvimento tecnológico, garantir a manutenção de incentivos durante o período estipulado etc, etc. Estes, ao contrário do discursos neo-liberal vigente, são instrumentos básicos de desenvolvimento tecnológico industrial, sendo utilizados por países como E.U.A. e Japão, por exemplo. Ou seja: o importante é manter a credibilidade governamental junto aos agentes do setor, permitindo um planejamento de longo prazo que, afinal, facilitará a criação de sinergias (do grego "synergía", cooperação) de cunho efetivamente produtivo entre os diversos agentes de decisão envolvidos.

Um segundo cenário, pessimista, seria a da ausência ou diminuição radical dos investimentos em setores de infra-estrutura e tecnologia de ponta. Neste caso, toda a tecnologia gerada em território nacional não teria utilização devido à ausência de estruturas satisfatórias de fomento, mecanismos de financiamento para o desenvolvimento de empresas de base tecnológica e capital para utilização destas tecnologias e seu desenvolvimento. Este tipo de abordagem levaria, evidentemente, ao sucateamento do pequeno parque empresarial e de pesquisa universitária, além da degradação das atividades nos centros de pesquisa atuantes na área. A dependência tecnológica externa seria acentuada em setores importantes como o de telecomunicações, o de computação e o militar, desestimulando o desenvolvimento de iniciativas empresariais com vistas à utilização de tecnologia nacional, geralmente repassada pelos centros de pesquisa e universidades às empresas.

Um terceiro cenário seria o da inserção do País no mercado externo de componentes optoeletrônicos e fotônicos. Obviamente, para que isto aconteça várias condicionantes encontradas no primeiro cenário, como as facilidades para o desenvolvimento econômico e tecnológico no mercado interno, deveriam estar presentes, visando um amadurecimento técnico e empresarial capaz de fazer frente aos competidores no mercado externo. Deve-se notar que, neste caso, a maior parte da produção deveria estar voltada para componentes de aplicação específica em setores não estratégicos, pois a produ-



ção de componentes para setores considerados estratégicos (certas faixas de mercado de telecomunicações, setor militar, aeroespacial e, principalmente, microeletrônica) geralmente é fomentada pelos países desenvolvidos enquanto que a produção de dispositivos voltados para o mercado de produção em massa exige escalas de produção não factíveis para o País devido ao porte dos recursos necessários para quebrar algumas barreiras de penetração neste tipo de mercado.

### VI.3. Comentários Finais

Deve-se notar que, apesar das tecnologias optoeletrônicas estarem fortemente agregadas ao complexo eletrônico, o potencial de inovações tecnológicas radicais oriundas desta tecnologia certamente possibilitará a redução de diversas barreiras de entrada nos mercados formados pelos diversos segmentos destinatários destas tecnologias, ou seja, é menos provável "perder o bonde" da optoeletrônica e fotônica tanto a nível de pesquisa básica, aplicada ou produção industrial, desde que os investimentos em capacitação tecnológica realmente passem a acontecer de forma decidida pelo Governo Federal, em primeiro lugar, e pelos Governos Estaduais, em segundo lugar.

No estabelecimento de políticas para o setor no Brasil deve-se prestar atenção ao fato de que, na medida em que os dispositivos e equipamentos baseados em tecnologias optoeletrônica ou fotônica venham a ocupar espaços em mercados anteriormente destinados a dispositivos e equipamentos eletrô-

nicos pode-se esperar que a disseminação da optoeletrônica e fotônica dependa, em grande parte, das políticas voltadas para o complexo eletrônico.

Desta forma, as tecnologias de optoeletrônica só poderão se desenvolver a contento na medida em que os mercados para estas tecnologias no Brasil estiverem bem ajustados vis-à-vis às políticas setoriais de telecomunicações, informática e entretenimento.

De qualquer forma, acredita-se que a melhor forma de abordagem empresarial seja a de atacar nichos de mercado, principalmente eletrônica profissional, de comunicações, a área militar e espacial. Na medida em que as empresas que pretendam atuar neste setor devem ter de alguma forma agilidade suficiente para acompanhar de forma eficiente as mudanças e evoluções tecnológicas, deve-se esperar o surgimento de pequenas empresas de gerência eminentemente tecnológica, atuando em nichos de mercado bem específicos, como componentes semicondutores compostos para telecomunicações, displays de aplicação específica, detectores rastreadores de infravermelho, em suma, produção de componentes de baixa demanda, alta confiabilidade e alto valor por unidade.

A nível acadêmico, espera-se que a tradicional discussão sobre a necessidade de formação de mão-de-obra especializada dê lugar à cobrança de um efetivo engajamento do Governo no sentido de priorizar o desenvolvimento tecnológico das universidades e fomentar o aumento das oportunidades de trabalho no setor, através da adoção das políticas setoriais

que incentivem o desenvolvimento das pequenas e micro empresas de alta tecnologia.

O aumento dos investimentos em desenvolvimento tecnológico nos centros de pesquisa governamentais deve ser uma das principais prioridades do Governo, na medida em que a tecnologia gerada nestes centros pode ser transferida para a indústria, gerando mais empregos especializados. Tomando-se como exemplo o CPqD, podemos dizer que as tecnologias de optoeletrônica desenvolvidas neste centro de pesquisas colocam-no como o principal fonte de tecnologia em dispositivos optoeletrônicos no hemisfério sul, além de desenvolver tecnologias no estado da arte internacional. Apesar de seu prestígio, o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento de TELEBRÁS encontra-se com em situação pouco alvissareira por falta um engajamento político mais claro do Governo Federal a favor do desenvolvimento de tecnologias de ponta em telecomunicações, por falta de verbas para a manutenção e expansão de seus programas de pesquisa, "a priori" garantidos por portaria do Ministério das Comunicações que pretendia, em parcelas crescentes, repassar recursos equivalentes a até 0,5% do orçamento da TELEBRÁS para a área de tecnologia microeletrônica do CPqD, incluindo aí a parte de optoeletrônicos.

Assim, cremos ser fundamental a retomada dos investimentos de cunho governamental a nível de:

- fomento mais forte à criação de empresas de alta tecnologia, geradora de empregos especializados;

- pesquisa básica em universidades e centros de pesquisa;

- pesquisa aplicada em centros de pesquisa governamentais;

- infra-estrutura de telecomunicações.

Este tipo de atitude poderá fazer com que o País aproveite o fato da optoeletrônica ser uma tecnologia relativamente nova, ou seja, cujas barreiras de entrada em mercados externos não são da mesma ordem de grandeza de tecnologias mais maduras, com negócios de maior porte e grandes concentrações de capital, como a microeletrônica com base em silício. Além disto, podemos adotar mais uma vez o discurso sempre correto de que este tipo de tecnologia é estratégico na medida em que todos os sistemas de telecomunicações, por exemplo, terão como base as tecnologias de optoeletrônica e fotônica, além dos sistemas destinados a utilização militar.

Deixando de lado o discurso estratégico, podemos adotar o discurso mercadológico e pragmático de que o País que detiver um grau suficiente de desenvolvimento tecnológico nestas áreas, tanto a nível de tecnologia básica como de produção, TERÁ FEITO UM GRANDE NEGÓCIO. Aparentemente toda a tecnologia de informações, informática, teleinformática, telecomunicações etc., está se dirigindo para a utilização extensiva de componentes optoeletrônicos e, mais, tarde, fotônicos.

Tomemos um exemplo. Atualmente o mercado de fibras óp-

ticas e sistemas ópticos de comunicações esta restrito, no Brasil, a troncos urbanos entre centrais telefônicas em cidades, com um volume aproximado de 2000 sistemas de segunda e terceira gerações. Evidentemente este mercado tem demanda reprimida muito grande devido à falta de investimentos em infra-estrutura no País. Além deste mercado existe ainda a demanda pela instalação de troncos interurbanos e internacionais. A difusão das tecnologias de comunicações ópticas acabará por levar a fibra óptica até a rede de assinantes, um mercado de volume praticamente incalculável pelo poder multiplicador gerado pela introdução de tal facilidade de comunicação de alta capacidade.

Além deste mercado, relacionado à TELEBRÁS, podemos relacionar aqueles outros mercados ligados à ferrovias, exploração e comércio de petróleo, sistemas de geração e distribuição de energia elétrica, equipamentos militares, redes locais de computadores etc.

Dificuldades políticas existem e sempre vão existir, principalmente na necessidade de integrar as políticas do complexo eletrônico para garantir a conjugação das demandas brasileiras do setor. Conforme exposto anteriormente, existe também a possibilidade de um modelo de exportação, mas para que este modelo seja bem sucedido é inevitável o aumento dos investimentos em pesquisa, desenvolvimento, incentivos diversos e redução das limitações para a importação e financiamento de bens de capital para as empresas, universidades e centros de pesquisas em optoeletrônica, incentivo à expor-

tação, programas de controle de qualidade e homologação de produtos por entidades internacionais etc.

Outro aspecto que deve ser levado em conta nas relações comerciais e tecnológicas é que cada vez mais os países desenvolvidos procuram proteger suas indústrias de tecnologia de ponta da competição externa, assim como monitoram cuidadosamente para que países este tipo de tecnologia pode ser vendida, seja de forma explícita (contratos de transferência de tecnologia) seja implícita (venda de equipamentos que tenham grande valor tecnológico agregado, como supercomputadores, por exemplo). A origem deste comportamento protecionista deve-se, principalmente, à excepcional importância das atividades de processamento de informações no mundo contemporâneo [112][113].

Os E.U.A. continuam querendo impor políticas protecionistas ao avanço japonês na área de semicondutores, procurando propor ao Congresso alterações em sua famosa lei anti-truste e negociando constantemente com o Japão acordos comerciais que preservem a indústria de alta tecnologia americana[108][111]. O papel do Estado, tanto nos E.U.A., Japão, Comunidade Econômica Européia e também na Coréia do Sul é fundamental para a viabilização dos setores de ponta como microeletrônica e optoeletrônica [110].

Portanto, estratégias protecionistas são discutidas e implementadas nos países com setores de tecnologia de ponta razoavelmente desenvolvidos e o Brasil não tem porque enveredar por uma trajetória neo-liberal estéril. É absolutamen-

te necessário aumentar os investimentos que tenham grande poder multiplicador a nível empresarial, paralelamente aos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, contribuindo para o aumento da geração de tecnologias de ponta, aumento de produtividade e qualidade, etc. e, antes de tudo, garantir a manutenção destes investimentos. O setor de optoeletrônicos é uma excelente oportunidade para o País tornar-se um dos poucos detentores mundiais de tecnologias para a Era da Informação.

CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 - HELLER, C. Microeletrônica: Considerações sobre a Necessidade e Viabilidade da Integração Vertical no Brasil, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia, Campinas, 1989. 305 págs.

2 - DOSI, G. Technological Diffusion: The Theory and Some Methodological Suggestions for the Study of the Brazilian Case, Consultancy Report of Project BRA/82/024 (ILO/UNPD and CNRH/IPEA), Brasília, April 1985. 52 págs.

3 - PEREZ, C. Las Nuevas Tecnologias: Una Visión de Conjunto, Rial, Santiago, 1982.

4 - FREEMAN, C. The Economics of Industrial Innovation, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1982, 250 pags.

5 - KAPLINSKY, R. Microelectronics and employment revisited: a Review, International Labour Office, Geneva, 1987. 181 págs.

6 - RADA, J.F. Microelectronics: Its Impacts and Policy Implications, UNIDO, ID/WG.372/5, 18 May 1982, 56 pags.



7 - BESSANT, J. et al. Integrated Manufacturing, Centre for Business Research, Brighton Business School, Brighton, U.K., December 1987. 92 págs.

8 - DINA, A. A Fábrica Automática e a Organização do Trabalho, Editora Vozes, Petrópolis, 1987. 101 págs.

9 - SCHONBERGER, R.J. Técnicas Industriais Japonesas: Nove lições Ocultas sobre Simplicidade, Pioneira, São Paulo, 1984. 309 págs.

10 - NISHIZAWA, J. The Transistor: A Look Back and A Look Ahead, Solid State Technology, 30(12):73-5, December 1987.

11 - COLCLASSER, R.A. Microelectronics: Processing and Device Design, John Wiley & Sons, New York, 1980. 332 págs.

12 - BARDEEN, J. Solid State Physics - 1947, Solid State Technology, 30(12):69-71, December 1987.

13 - ROSS, I. Chance Favors The Prepared Mind, Solid State Technology, 30(12):77-8, December 1987.

14 - ABRAHAM, E. et al. The Optical Computer, Scientific American, 248(2):63-71, February 1983.

15 - LINDGREN, N. Optical Communications - A Decade of Preparations, Proceedings of the IEEE, 58(10): 1410-8, October 1970.

16 - GEUSIC, J.E. et al. Coherent Optical Sources for Optical Communications, Proceedings of the IEEE, 58(10): 1419-36, October 1970.

17 - CAUFIELD, H.J. Computing with Light, Byte, 14(10):231-237, October 1989.

18 - TIPLER, P.A. Física Moderna, Guanabara Dois, 1981, 422 págs.

19 - PUDENSI, M.A.A. LED, in Comunicações Ópticas, Laboratório de Pesquisas em Dispositivos/Instituto de Física/UNICAMP-CPqD Telebrás, 1981.

20 - SUEMATSU, Y. et al. Introduction to Optical Fiber Communications, John Wiley & Sons, 1982, 210 pags.

21 - KEISER, G. Optical Fiber Communications, McGraw-Hill Book Company, 1983, 320 pags.

22 - DUTTA, N.K. III-V Device Technologies For Lightwave Applications, AT&T Technical Journal, 68(1):5-18, January/February 1989.

23 - PATEL, N. Diodo Laser e LED: Princípios Físicos de Operação, in Comunicações Ópticas, Laboratório de Pesquisas em Dispositivos/Instituto de Física/UNICAMP-CPqD Telebrás, 1981.

24 - SANDBANK, C.P. Optical Fibre Communication Systems, John Wiley & Sons, 1981.

25 - REGO, A.C.B. Fotodetector: A Fotodeteccção nos Receptores Usados em Sistemas de Comunicações Ópticas, in Comunicações Ópticas, Laboratório de Pesquisas em Dispositivos/Instituto de Física/UNICAMP-CPqD Telebrás, 1981.

26 - SHIBATA, J. et al. Optics and Electronics are Living Together, IEEE Spectrum, 34-8, February 1989.

27 - LEHENY, R.F. Optoelectronics Integration: A Technology for Future Telecommunication Systems, IEEE Circuits and Devices Magazine, 38-41, May 1989.

28 - SENIOR, J.M. Optical signal processing for lightwave communications and computation: Part one, Optics and Laser Technology, 20(2):75-80, April 1988.

29 - GOELL, J.E. Integrated Optical Circuits, Proceedings of the IEEE, 58(10):1504-12, October 1970.

30 - SENIOR, J.M. Optical signal processing for lightwave communications and computation: Part two, Optics and Laser Technology, 20(3):131-8, June 1988.

31 - FORREST, G.T. Reflected Light, Byte, 14(10):249-256, October 1989.

32 - CHEN, F. Modulators for Optical Communications, Proceedings of the IEEE, 58(10): 1440-55, October 1970.

33 - LEE, J.N. et al. Acousto-optic Signal Processing and Computing, Proceedings of the IEEE, 77(10):1528-55, October 1989.

34 - ARAÚJO, C.B. Optoeletrônica Ultra-Rápida: O Cheaveamento da Luz, Ciência Hoje, 9(51):36-42, Março de 1989.

35 - DAVIDOVITCH, L. A Busca dos Computadores Ópticos, Ciência Hoje, 3(18):12-4, Maio/Junho de 1985.

36 - BELL, T.E. Optical Computing: A Field In Flux, IEEE Spectrum, 34-57, August 1986.

37 - Newport Catalog, Newport Corporation.

38 - GLOGE, D. Optical Waveguide Transmission, Procee-

dings of the IEEE, 58(10): 1513-30, October 1970.

39 - BROOKING, N.L. Aplicações de Fibras Ópticas no Setor Elétrico, in Comunicações Ópticas, Laboratório de Pesquisas em Dispositivos/Instituto de Física/UNICAMP-CPqD Telembrás, 1981.

40 - MURRAY, A. Semicondutores: O Prejuízo É do Consumidor, Panorama da Tecnologia, 3(2), 10-13, INPI, 2º Trimestre/1989.

41 - OKOSHI, T.; Kikuchi, K. Coherent Optical Fiber Communications, KTC Scientific Publishers/Tokyo, 1988, 275 pages.

42 - CATHEY, T. et al. Digital Computing with Optics, Proceedings of the IEEE, 77(10):1558-72, October 1989.

43 - Bell Labs Displays its Digital Optics Processor, Photonics Spectra, 24(2):16, February 1990.

44 - Bell Labs: Ignoring the Obits, Photonics Spectra, 24(8):66-8, August 1990.

45 - GOODMAN, J.W. Levels of Light, Byte, 14(10):240-2, October 1989.

46 - CHANNIN, D.J. Joining Forces, Byte, 14(10):244-8, October 1989.

47 - PARISH, T. Crystal Clear Storage, Byte, 15(12):283-8, November 1990.

48 - YANIV, Z., Liquid Crystals: The New Wave in Displays, Photonics Spectra, 23(4): 95-100, April 1989.

49 - Active Matrix LCDs - The Choice for the 1990s, Photonics Spectra, 24(1):147, January 1990.

50 - LCD Market in Europe Expected to Grow Fast, Photonics Spectra, 25(1):44, January 1991.

51 - SCHULTHEISS, E. et al. Production Technology for Magneto-optic Data Storage Media, Solid State Technology, 31(3):107-12, March 1988.

52 - HARVEY, D.A. State of the Media, Byte, 15(12):275-81, November 1990.

53 - RYAN, B. Entering a New Phase, Byte, 15(12):289-96, November 1990.

54 - APIKI, S. The Optical Option, Byte, 14(10):160-74, October 1989.

55 - Japan Electronics Almanac 1988, Dempa Publication Inc.

56 - BURKE, J.J. et al. Gigabytes On-Line, Byte, 14(10):259-64, October 1989.

57 - FREESE, R.P. Erasable Optical Systems Enter the Mainstream, Photonics Spectra, 23(10):129-32, October 1989.

58 - PIRAGIBE, C. Políticas para a Indústria Eletrônica nos Novos Países Industrializados (NICS): Lições para o Brasil?, Projeto IPLAN/PNUT/OIT (BRA/82/024), Brasília, Agosto de 1986.

59 - BAPTISTA, M.A.C. Indústria Eletrônica de Consumo a Nível Internacional e no Brasil: Padrões de Concorrência, Inovação Tecnológica e Caráter da Intervenção do Estado, Instituto de Economia - UNICAMP, Campinas, Agosto de 1987.

60 - SIEGMUND, W.P. Fiber's Role in Military Night Vision, Photonics Spectra, 24(7):95-8, July 1990.

61 - SIURI Jr., W.D. Laser Beam Replaces Tracer Rounds, Photonics Spectra, 24(7):101, July 1990.

62 - SANTOS, R.R.P. Aplicações Militares, in Comunica-

ções Ópticas, Laboratório de Pesquisas em Dispositivos/Instituto de Física/UNICAMP-CPqD Telebrás, 1981.

63 - WAHL, J. New Fibers Meet Sensing Demands, Photonics Spectra, 22(12):79-84, December 1988.

64 - GIALLORENZI, T.G. Optical-fiber sensors challenge the competition, IEEE Spectrum, 44-9, September 1986.

65 - ORTEGA, D. New Sensor Techniques Boost Quality and Productivity, Photonics Spectra, 24(2):85-90, February 1990.

66 - VENGSARKAR, A.M. et al. Fiber Sensors in Aerospace Applications: The Smart Structures Concept, Photonics Spectra, 24(4):119-124, April 1990.

67 - WEISS, D.W. The Pressure Approach to Fiber Liquid-Level Sensors, Photonics Spectra, 24(11):119-23, November 1990.

68 - BERTHOLD, J.W. Fiber Optic Intensity Sensors: Commercial Hardware For Industrial Applications, Photonics Spectra, 22(12):125-138, December 1988.

69 - Finding Peaceful Uses for Military Systems, Photonics Spectra, 24(7):103-4, July 1990.



70 - STRZEMPKO, T. et al. Surveillance Applications of Infrared Imaging, Photonics Spectra, 24(4):127-132, April 1990.

71 - STAHL, K.J. IR-Detectors: State-Of-The-Art, Future Trends, Photonics Spectra, 23(9):95-8, September 1989.

72 - RESSO, M.J. et al. The Hunt for Cost-effective IR Transducers, Photonics Spectra, 24(4):111-6, April 1990.

73 - Applications for FO Gyroscopes, Photonics Spectra, 24(1):118-20, January 1990.

74 - Relatório do Grupo de Microeletrônica - GME e Proposta do Plano Setorial de Microeletrônica, Secretaria Especial de Informática, Brasília 1990.

75 - Microeletrônica e Informática: Uma Abordagem sob o Enfoque do Complexo Eletrônico, Área de Planejamento, Departamento de Estudos do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, Fevereiro 1990.

76 - Portaria 123 de 27/02/91, Diário Oficial da União, 28/02/91.

77 - RIPPER, J.E. O Programa Brasileiro de Comunica-

ções Ópticas, in Comunicações Ópticas, Laboratório de Pesquisas em Dispositivos/Instituto de Física/UNICAMP-CPqD Telebrás, 1981.

78 - REGO, A.C.B. Tendências de Mercado em Optoeletrônica, CPqD/TELRBRÁS, 1988.

79 - REGO, A.C. Bordeaux, Desenvolvimentos Recentes em Dispositivos Optoeletrônicos, CPqD - Telebrás.

80 - Laser Semicondutor de Fosfeto de Índio: O Brasil Alcança o Estado da Arte Internacional, CPqD - Telebrás.

81 - COGHI, C.M.A., REGO, A.C.B., et al., Desenvolvimento de Lasers de InGaAsP/InP Tipo Ridge Waveguide, CPqD-Telebrás.

82 - NETO, R.A. et al. DFB-DCPBH InGaAsP/InP Lasers for 1550 nm Optical Communication Systems, IEEE, CH2901-7/90/0000-0446, "paper" avulso 1990.

83 - Comunicações Ópticas - Optoeletrônica, Documento CPqD Telebrás.

84 - BERGH, A.A. American Optoelectronics: Pavement for a Bumpy Economic Road, IEEE Circuits and Devices, May 1990, 32-8.

85 - Fibra Óptica: A Disputa fica metro a metro, Ipesi Eletro-eletrônica, 11(2):32-3, Março/Abril/1991.

86 - Comunicações: O fim da linha cruzada, Ipesi Eletro-eletrônica, 10(1):20-2, Janeiro/Fevereiro/1990.

87 - Perspectivas Paradoxais, Ipesi Eletro-eletrônica, 8(6):18-20, Novembro/Dezembro/1988.

88 - Um produto de fibra, Ipesi Eletro-eletrônica, 9(3):48-50, Maio/junho/1990.

89 - Cristal Líquido: A Indústria Investe Pesado, Informática Hoje, pag. 16, 1º/agosto/1988.

90 - Laboratório do CTI, um Núcleo Pioneiro, Informática Hoje, pag. 16, 1º/agosto/1988.

91 - CAULFIELD, H.J. et al. Optical Neural Networks, Proceedings of the IEEE, 77(10):1573-89, October 1989.

92 - FLANNERY, D.L. et al. Fourier Optical Signal Processors, Proceedings of the IEEE, 77(10):1511-25, October 1989.

93 - TANK, D.W. Collective Computation In Neuronlike

Circuits, in Scientific American Trends In Computing, Special Issue, Vol. 1, 1988.

94 - GHERGIA,V. et al. Introduction to Integrated Optics, in Optical Fibre Communication, Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni, pag. 803, MacGraw-Hill, 1981.

95 - SCUDELLARI,A. Light Propagation In Integrated Optics Waveguides, in Optical Fibre Communication, Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni, pag. 807, MacGraw-Hill, 1981.

96 - SCUDELLARI, A. Integrated Optics Devices, in Optical Fibre Communication, Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni, pag. 829, MacGraw-Hill, 1981.

97 - GHERGIA,V. et al. Future Trends In Integrated Optics, in Optical Fibre Communication, Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni, pag. 867, MacGraw-Hill, 1981.

98 - MADAN,A. Amorphous Silicon: from promise to practice, IEEE Spectrum, 38-43, September 1986.

99 - LOVELY, P.S. The Principles of Chromatic Dispersion, Telephone, Engineer & Management, 93(4):53-6, February, 15 1989.

100 - SHUMATE, P.W. Optical Fibers Reach into Homes, IEEE Spectrum, February 1989.

101 - ECCLESTON, D.J. In The Loop, It's Fibers Mechanical, Not Optical, Performance That Counts, Photonics Spectra, 25(2):123-30, February 1991.

102 - ISHIKAWA, M. Optical Neurocomputing, Science and Technology In Japan, 9(34):14-5, June 1990.

103 - YATAGAI, T. Parallel Optical Computing, Science and Technology In Japan, 9(34):16-8, June 1990.

104 - KAMIYA, T. Semiconductor Optoelectronics for Optical Computing, Science and Technology In Japan, 9(34):7-8, June 1990..

105 - HAYASHI, I. Optoelectronic Integrated Circuit - The Key To Optical Computing, Science and Technology In Japan, 9(34):8-10, June 1990.

106 - FLANNERY, D.L. et al. Fourier Optical Signal Processors, Proceedings of the IEEE, 77(10):1511-25, October 1989.

107 - CAUFIELD, H.J. et al. Optical Neural Networks, Proceedings of the IEEE, 77(10):1573-82, October 1989.

108 - ARRUDA, M. Brasil: É Essencial Reverter o Atraso, Panorama da Tecnologia, 3(2), 4-9, INPI, 2º Trimestre/1989.

109 - CORREA, C.M. EUA Querem Maior Proteção Para Tecnologia, Panorama da Tecnologia, 3(2), 19-25, INPI, 2º Trimestre/1989.

110 - GUY, K., Arnold, E. Global Trends In Microelectronic Components and Computers, Technology Trends Series Nr. 3, UNIDO, IPCT. 33, 19 June 1987.

111 - OKIMOTO, D. (Ed.) et al. Competitive Edge: The Semiconductor Industry in the U.S. and Japan, Standford University Press, 1984. 275 págs.

112 - MASUDA, Y. A Sociedade da Informação Como Sociedade Pós-Industrial, Editora Rio, 1982. 212 págs.

113 - LE QUÉMENT, J. L'Usine du Futur Proche, Stratégies Internationales d'automatisation, Agence de Línformatique 1983. 205 págs.

REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

ADAMS, A.C. Multiple Quantum Well Spatial Light Modulators, Photonics Spectra, 24(5):191-4, May 1990.

ALLES, D.S. et al. Packaging Technology For III-V Photonic Devices and Integrated Circuits, AT&T Technical Journal, 68(1):83-92, January/February 1989.

ANBALAGAN, R.S. Morphological Processing, Photonics Spectra, 23(9):91-2, September 1989.

ARMSTRONG, J.A. Solid State Technology And The Computer: 40 Years Later, Small is Still Beautiful, Solid State Technology, 30(12):81-3, December 1987.

ARNDT, W. Laser Ranging Device Keeps Car Apart, Photonics Spectra, 24(7):133-4, July 1990.

BACK, B. Adaptative Welding Increases Quality, Photonics Spectra, 25(1):181-5, January 1991.

BEAUCHAMP, W.T. Thin Films On Flexible Substrates, Photonics Spectra, 23(9):77-84, September 1989.

BEGLEY, D.L. et al. A Bright Future for Laser Diodes, Photonics Spectra, 24(6):165-172, June 1990.

BEGLEY, D. et al. Laser Diodes Conquer the Challenge of Space Communications, Photonics Spectra, 23(4):147-55, April 1989.

BOTEZ, D. et al. Phase-Locked Arrays of Semiconductor Diode Lasers, IEEE Circuits and Devices Magazine, 8-16, January 1986.

BOYD, D.L. Integrated Imaging: Wave of the Future, Photonics Spectra, 24(5):147-150, May 1990.

CAPRON, B.A. Optical Biestability Switches into Systems, Photonics Spectra, 24(3):135-44, March 1990.

CAUFIELD, H.J. Capitalizing On Optics For ATR, Photonics Spectra, 25(1):137, January 1991.

CD-ROMs, Erasables Pace Storage Market, Photonics Spectra, 23(10):42-4, October 1989.

CHAPPEL, A. (Editor) Optoelectronics: Theory and Practice, TEXAS Instruments, 1976, 440 pages.

CIMMA, D. et al. Nothing Zips It Up Like a Laser, Photonics Spectra, 23(12):117-8, December 1988.



Coming Advances in Photonics, Photonics Spectra, 24(1):117-8, January 1990.

DAUTREMONT-SMITH, W.C. et al. Fabrication Technologies For III-V Compound Semiconductor Photonic and Electronic Devices, AT&T Technical Journal, 68(1):64-82, January/February 1989.

Defense Technology Will Rule the '90s, Photonics Spectra, 23(12):50-2, December 1989.

DEGNAN, K.E. HDTV Roundup, Satellite Communications, 10, January 1991.

D'EPAGNIER, D. et al. Design Considerations for Diode Laser Transmission Lines, Photonics Spectra, 24(11):125-8, November 1990.

DEYOUNG, H.G. Fiber Seeks a Place in the Plant, Photonics Spectra, 23(5):113-20, May 1990.

EDEN, J.G. Photochemical Processing of Semiconductors: New Applications for Visible and Ultraviolet Lasers, Circuits and Devices Magazine, 18-24, January 1986.

EVANS, P.B. et al. Brasil e Coréia: Para Além dos Clones, Novos Estudos CEBRAP, 24: 110-130, Julho de 1989.

Fiber and Disks in the 1990s, Photonics Spectra, 24(1):122-6, January 1990.

Fiber Optics is Coming Home, Photonics Spectra, 24(1):120-2, January 1990.

FLETCHER, P.W. et al. New Developments in Ultrafast Lasers, Photonics Spectra, 24(7):111-20, July 1990.

FOLEY, J.D. Interfaces For Advanced Computing, in Scientific American Trends In Computing, Special Issue, Vol. 1, 1988.

GHERGIA, V. Materials, Characterization Methods and Technologies, in Optical Fibre Communication, Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni, pag. 847, MacGraw-Hill, 1981.

GREGORY, G. Japanese Electronics Technology: Enterprise and Innovation, John Wiley & Sons, 1985, 450 pages.

GRIMES, G. Where Microwave and Optics Meet, Photonics Spectra, 23(5):101-10, May 1990.

GUGGER, C. P. Fiber Takes on New Roles in Imaging Applications, Photonics Spectra, 24(2):93-6, February 1990.

HARRIS, D.M. Future Trends In Medical Lasers, Photonics Spectra, 25(1):113-7, January 1991.

HeNe Vs. Diode: The Race Heats Up, Photonics Spectra, 23(4):58, April 1989.

HEYWOOD, J. Robots Meet Machine Vision, Photonics Spectra, 23(5):151-6, May 1990.

HICKERNELL, F.S. Optical Waveguides on Silicon, Solid State Technology, 31(11):83-8, November 1988.

HUBER, J.C. Industrial-Strength Fiber Networks, Photonics Spectra, 24(8):107-8, August 1990.

IBM Photonic Chips Link Computers, Photonics Spectra, 23(10):36-8, October 1989.

IONSON, J.A. Photonics in the Year 2001, Photonics Spectra, 24(1):86-7, January 1990.

IRVING, B.R. et al. Optical Design Software: on the Fast Track, Photonics Spectra, 24(10):99-102, October 1990.

Japan Electronics Almanac 1988, DEMPA Publication, 1988, 340 pages.

Japanese Laser Makers Look to the Future, Photonics Spectra, 24(11):52-4, November 1990.

JAY, J.A. et al. Dispersion-shifted fiber Hits Its Stride, Photonics Spectra, 24(9):153-8, September 1990.

JOHNSTON, W.D. et al. Liquid and Vapor Phase Growth of III-V Materials For Photonic Devices, AT&T Technical Journal, 68(1):53-63, January/February 1989.

KASAHARA, K. Optical Interconnections, Science and Technology In Japan, 9(34):11-2, June 1990.

KAYE, G.M. Photonics in the Age of Glasnost, Photonics Spectra, 24(1):68-70, January 1990.

KAYE, G.M. A Not-So-Bright Outlook for Lasers, Photonics Spectra, 24(11):72-4, November 1990.

KNITTL, Z. Optics of Thin Films, John Wiley and Sons, Prague, 1976, 550 pags.

KUROKAWA, T. Optical Signal Processing, Science and Technology In Japan, 9(34):12-3, June 1990.

KUWAHARA, H. Coherent Optical Fibre Communication, Science and Technology In Japan, 9(34):24-5, June 1990.

LACHTERMACHER, S. Discos sob nova óptica, Dados e Idéias, Novembro de 1989.

LAU, K.-Y. High Speed Semiconductor Laser Technology, Solid State Technology, 31(3):91-5, March 1988.

Lasers Facilitate IC Production, Photonics Spectra, 25(1):103, January 1991.

LASER REPORT, 24(1), January 9, 1988.

Laser Wavelength: A 4TH Neural Dimension, Photonics Spectra, 24(11):76, November 1990.

LEES, C. The Soliton Solution, Telecommunications, 21(12): 51-65, December 1987.

LEWIS, R. With Lasers, You Can Operate on Cells, Photonics Spectra, 24(7):74-8, July 1990.

LEWIS, R. Skin-Deep Laser Surgery, Photonics Spectra, 24(11):82-4, November 1990.

LI, K. Trends For Low-Cost Laser Receptacles, Photonics Spectra, 25(1):122, January 1991.

LINGREN, N. Optical Communications - A Decade of Preparations, Proceedings of the IEEE, 58(10):1410-18, October 1970.

MACGREGOR, A. Silicon Avalanche Photodiodes for Low-Light, High-Speed Systems, Photonics Spectra, 25(2):139-46, February 1991.

MAHONY, T. Diode Lasers: Pushing The Envelope, Photonics Spectra, 25(1):103-6, January 1991.

MAHONY, T, et al. Diode Laser Statistical Impact on Collimated Beam Size, Photonics Spectra, 24(12):123-6, December 1990.

MALECKI, E.J. High Technology and Local Economics Development, American Planning Association Journal, Summer 1984.

MCCANN, B.P. Fiber Holds the Key to Medical Lasers' Success, Photonics Spectra, 24(5):127-136, May 1990.

MEINDL, J.D. Opportunities for Gigascale Integration, Solid State Technology, 30(12):85-9, December 1987.

MELLIAR-SMITH, C.M. Photonic and Electronic Device Technology, AT&T Technical Journal, 68(1):2-4, January/Fe-

bruary 1989.

Military Pushes New Fiber Technology, Photonics Spectra, 24(2):80-2, February 1990.

Mitsubishi Announces Optical "neurochip", Photonics Spectra, 23(3):56, March 1989.

MOLLENAUER, J.F. Metropolitan Area Networks: A New Application for Fiber, Photonics Spectra, 24(3):159-61, March 1990.

MORGAN, R.A. VCSEL: A New Twist in Semiconductor Lasers, Photonics Spectra, 24(12):89-92, December 1990.

MORKOÇ, H. et al. Gallium Arsenide on Silicon: A Review, Solid State Technology, 31(3):71-5, March 1988.

MOSS, T. Projection Displays: A New Wave for the Next Decade, Photonics Spectra, 24(8):111-4, August 1990.

MOTODATE, J. Visible Laser Diodes: Opening the Way to New Applications, Photonics Spectra, 23(12):113-6, December 1989.

MURATA, H. Desenvolvimentos Recentes das Fibras Ópticas, Cabos Ópticos e Tecnologias Relacionadas, in Tendências

no Campo da Opto-eletrônica e nos Sistemas de Comunicação por Fibras Ópticas, OITDA.

MURDOCCA, M. et al. Logic Interconnects in Optical Computers, Photonics Spectra, 24(12):129-34, December 1990.

MURRAY, B. Fiber Closes in on The Loop, Laser Focus/Electro-Optics, 134-40, February 1988.

Nec is Producing 632.9nm Visible CW, Photonics Spectra, 24(12):53, December 1990.

NELSON, R.R. High Technology Policies: A Five Nation Comparison, American Enterprise Institute for Public Policy Research, Washington and London, 1984. 94 págs.

Neural Networks: From Promise to Reality, Photonics Spectra, 24(1):140, January 1990.

New Jobs for Charge-Transfer Devices, Photonics Spectra, 24(11):86-8, November 1990.

New Jobs for Liquid Crystals, Photonics Spectra, 24(4):82-4, April 1990.

SLATER, N. A New Breed of Diode Laser, Photonics Spectra, 24(4):181-6, April 1990.



Optical Disk Drives Poised for Boom, Photonics Spectra, 24(10):45-6, October 1990.

Optics in the 1990s and Beyond, Photonics Spectra, 24(1):91, January 1990.

PANISH, M.B. Molecular-Beam Epitaxy, AT&T Technical Journal, 68(1):42-52, January/February 1989.

PAOLI, T.L., Ripper, J.E. Direct Modulation of Semiconductor Lasers, Proceedings of the IEEE, 58(10): 1457-70, October 1970.

Photo CD's Are On The Way, Photonics Spectra, 25(1):76-8, January 1991.

MARTIN, E.W. Photonics: A Lever to Change the World, Photonics Spectra, 25(1):84-5, January 1991.

Photonics Gets a Green Light from Detroit, Photonics Spectra, 23(5):159-62, May 1990.

Photonics in Japan: A Booming Business, Photonics Spectra, 24(9):50-1, September 1990.

Polarization Optics: A Look at The Future, Photonics Spectra, 25(1):87-8, January 1991.

PULKER, H.K., A New Look At Optical Coating Techniques, Photonics Spectra, 24(2):100-5, February 1990.

Quantum Mechanical Optical Computing, Photonics Spectra, 24(1):140-1, January 1990.

Researchers Report Optical Neural Net, Photonics Spectra, 24(11):54-8, November 1990.

REED, T. Holographic NDT Looks to the 90s, Photonics Spectra, 23(11):139-142, November 1989.

RINTZ, C.L. Designing With Image Tubes, Photonics Spectra, 23(12):141-44, December 1989.

ROBINSON, R.B. Emerging Strategies In The Venture Capital Industry, Journal Of Business Venturing 2:53-77, Elsevier Science Publishing Co. 1987.

ROUSSEL, J.M. Designing for Deep-UV Lithography Optics, Photonics Spectra, 23(4), 89-92, April 1989, 43-7.

SANFORD, F.L. Polycarbonate: The Next Optical Fiber?, Photonics Spectra, 23(10):83-6, October 1989.

SCHICK, L. Laser Micromachining in Circuit Production, Photonics Spectra, 23(11):90-4, November 1989.

SCHMITT, L. Neural Networks For OCR, Photonics Spectra, 24(10):114-5, October 1990.

SCHUSTER, C.M. Designing With Laser Technology, Photonics Spectra, 25(1):187-8, January 1991.

SHAH, N.J. et al. III-V Device Technologies For Electronic Applications, AT&T Technical Journal, 68(1):19-28, January/February 1989.

SILVERNAIL, L. P. Optical Computing: Does Its Promise Justify the Present Hype?, Photonics Spectra, 24(9):127-6, September 1990.

Solid State Laser Gives Visible Light, Photonics Spectra, 25(1):52, January 1991.

Solid-State Laser-scanner Developments, Photonics Spectra, 24(1):93-4, January 1990.

SOREF, R.A. et al. Silicon Guided-Wave Optics, Solid State Technology, 31(11):95-8, November 1988.

SPENCER, K. The Optical Tape Recorder: Easy Data Handling at Less Cost, Photonics Spectra, 24(2):115-6, February 1990.

SURAT, C. Fiber Cable: Market Trends and Technology, Photonics Spectra, 24(12):95-8, December 1990.

SUZUKI, Y. Microchannel Spatial Light Modulator, Science and Technology In Japan, 9(34):19-20, June 1990.

Taiwan: Will It Be a Semiconductor Giant?, Solid State Technology, 30(12):31-2, December 1987.

Taiwan's Optics Industry Set To Boom, Photonics Spectra, 25(1):93-6, January 1991.

The Burning Bright Future Of Lasers, Bussiness Week, April 16, 1990, 59-60.

The Changed World Economy, Foreign Affairs, 64(4):769-791, Spring 1986.

TING, W. The Product Development Process In NIC Multinationals, Columbia Journal of World Business, 76-81, Spring 1982.

TRUETT, W.L. Laser Revolutionizing the Workplace, Photonics Spectra, 24(8):91-6, August 1990.

TROY, T.T. Pentagon Calls Photonics a "Critical" Tech-

nology, Photonics Spectra, 24(10):83, July 1990.

TSANG, W.T. The C3 Laser, in Scientific American Trends In Computing, Special Issue, Vol. 1, 1988.

UCHIDA, T. Tendências Tecnológicas em Optoeletrônica, in Tendências no Campo da Opto-eletrônica e nos Sistemas de Comunicação por Fibras Ópticas, OITDA.

Visible Diode Lasers get ready for 1990s, Photonics Spectra, 24(1):106, January 1990.

WALKENS, R.S. Watch Out Photography, Here Come HCCD Cameras, Photonics Spectra, 24(11):95-106, November 1990.

WERTH, D.L. Lasers Diodes Growing Up, Photonics Spectra, 23(4):133-6, April 1989.

WOJTUNIC, H.J. Fiber Optics Drive Laser Development, Photonics Spectra, 25(1):118-21, January 1991.

YAMAMOTO, S. Optically Addressed Spatial Light Modulators Using FLCs, Science and Technology In Japan, 9(34):20-1, June 1990.