

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Microonda e Óptica

DISPOSITIVOS ÓPTICOS COM TECNOLOGIA PLANAR E COM FIBRA ÓPTICA

Horicléa Sampaio Monteiro

Orientador : Dr. Evandro Conforti

Co-Orientador : Dr. Sergio Celaschi

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por <u>Horicléa Sampaio Monteiro</u> e aprovada pela Comissão Julgada em <u>04 / 07 / 97</u> <u>Evandro Conforti</u> Orientador

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

04 de Julho de 1997

M764d

32315/BC

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T
V.	M764d
TUMBO BC/	32315
PROC.	281/97
°C	<input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	28/11/97
N.º CPD	

CM-00103833-6

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M764d Monteiro, Horicléa Sampaio
Dispositivos ópticos com tecnologia planar e com fibra
óptica. / Horicléa Sampaio Monteiro.--Campinas, SP:
[s.n.], 1997.

Orientadores: Evandro Conforti, Sergio Celaschi.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Acopladores direcionais. 2. Troca iônica. 3. Fibras
ópticas. 4. Guias de ondas. I. Conforti, Evandro. II.
Celaschi, Sergio. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV.
Título.

Aos meus pais, pelo legado maior: amor,
cultura, determinação, moral, ética e fé...

Ao meu marido e amigo Antonio, por
todos os momentos compartilhados e por
ter feito seus os meus sonhos...

e as nossas filhas Isabela e Gabriela,
dáviva maior de nossas vidas....

dedico esta Tese

Cada um que passa em nossa vida, passa sozinho,
pois cada pessoa é única e nenhuma substitui outra.

Cada um que passa em nossa vida,
passa sozinho, mas não vai só,
nem nos deixa sós;
leva um pouco de nós mesmos,
deixa um pouco de si mesmo.

Há os que levam muito, mas há os que não levam nada,
Há os que deixam muito, mas há os que não deixam nada.
Esta é a maior responsabilidade de nossa vida e prova evidente
de que duas almas não se encontram por acaso.

Antoine de Saint Exupéry

AGRADECIMENTOS

- Aos meus irmãos Paulina e Paulo A. de Souza Pinto, pelo início de tudo...
- Aos amigos Maria Izabel e José Carlos Valadão de Mattos por vivenciarem comigo a identificação da minha “Lenda Pessoal”...
- Aos meus irmãos Maria Helena e Fábio O. de Mara, pela força e pelo apoio logístico ...
- Ao Prof. e amigo Carlos Alberto Lima, pelo frequente estímulo e cobrança da “fotografia”.
- A irmã e amiga Josira Sampaio, pelas ricas sugestões e revisão deste trabalho.
- Ao meus orientadores Evandro Conforti e Sérgio Celaschi, pela orientação deste trabalho, pelas valiosas discussões, pela amizade e porque acreditaram...
- Ao Prof. Ramakant Srivastava pela força, pelo apoio, pela amizade, pela sabedoria, pelo exemplo de humildade, pelos ensinamentos e pelo sentido de humanidade!
- Aos amigos Sonia M. de Oliveira, Marcia Zago, Joceli Angelini e César Évora, por muitos dos momentos no CPqD.
- Aos colegas do “dia a dia”, especialmente ao Júlio C. Said, Roberto Arradi, João Mendes, Fernando Pinto, Danilo C. Dini, Amauri Juriollo, Martin H., Mário Mercadante, M. Fernanda Levantezi, Eliane M. Grigoletto, Mariângela R. Sanches e à caçulinha de Grupo mas, já tão querida, Miriam X. de Barros, pelas contribuições dadas e por compartilharem conhecimentos, alegrias, tristezas, angústias, ansiedades e sucessos...
- Aos colegas Edna Sato, Ederval Missio e Kazuke Jomori, pelas preciosas Fotograções.
- Aos colegas J.Tadeu de Jesus, pelas valiosas discussões e Felipe R. Barbosa, pelas valiosas discussões e pela caracterização óptica dos Divisores de Potência Óptica.
- Aos colegas Paulo Miguel, Jorge Lacroux e Waldir Donadon, pelo fantástico trabalho de gerar o Banco de Dados que originou nossa primeira Máscara Litográfica do Distribuidor Estrela.
- Ao CCS/FEE (Unicamp), através do Prof. Luiz Carlos Kretly e dos colegas Emílio C. Bortolucci e Aluísio T. Gallo, pela confecção das Máscaras Litográficas e pela rica interação no transcorrer do Convênio CCS / CPqD.
- Aos Professores Paulo França e Rui Fragassi, por todo o apoio recebido.
- E ao CPqD, por permitir a execução desta Tese...

A todos vocês, que estiveram tão presentes em minha vida...

meus sinceros agradecimentos por tanto que deixaram!!!

Resumo

A evolução da tecnologia de Fibras Ópticas, nos últimos vinte anos, disponibilizou aos sistemas ópticos uma ampla largura de banda que, entretanto, permanece ociosa.

A utilização eficiente desta ampla largura de banda requer o desenvolvimento de dispositivos ópticos que possibilitem interagir com o sinal propagante para, com perdas mínimas, acoplar, dividir, multiplexar, atenuar o sinal propagante, sem que este seja removido do interior das fibras.

Com este objetivo, esta Tese estabeleceu a metodologia de fabricação de Dispositivos a Fibra e de Dispositivos Planares, pelas Técnicas de Polimento e de Troca Iônica, respectivamente.

Pela Técnica de Polimento, foram fabricados e caracterizados quatro tipos de dispositivos:

- Divisor de Potência Óptica com razão de acoplamento variável.
- WDM, com 7,2 dB de isolação por canal e 20 dB de isolação entre canais.
- Acoplador que mantém o estado da polarização da luz incidente, com 27 dB de extinção.
- Atenuador Óptico, possibilitando até 30 dB de atenuação.

Todos os dispositivos apresentaram perda de inserção inferior a 0,2 dB e diretividade superior a 50 dB.

A Técnica de Troca Iônica ficou restrita à confecção dos Divisores de Potência Óptica superficiais e enterrados, nas configurações 1 x 16, 1 x 8, 1 x 4. O trabalho cumpriu as seguintes etapas:

- Projeto e confecção de máscaras
- Confecção dos Divisores de Potência Óptica, superficiais e enterrados
- Caracterização óptica dos dispositivos

Os dispositivos superficiais 1 x N apresentaram perdas de propagação de 2,1 dB/cm, enquanto os enterrados apresentaram perdas de propagação de 1,9 dB/cm. A perda na ramificação em Y é da ordem de 3,8 dB, em guias superficiais, e de 3,6 dB em guias enterrados.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Motivação	18
1.2 Bibliografia anotada	23
1.2.1 Técnica de Polimento	23
1.2.1.1. Acopladores não Recíprocos	27
1.2.1.2 Acopladores que Mantêm o Estado de Polarização da Luz	28
1.2.1.3 Amplificadores	29
1.2.1.4 Chaves Ópticas	30
1.2.1.5 Filtros	30
1.2.1.6 Modulador	33
1.2.1.7 Multiplexador	35
1.2.1.8 Polarizador	37
1.2.2 Técnica de Troca Iônica	38
1.3 Principais Contribuições	42
1.4 Resumo do Trabalho	44
2. UNIDADE BÁSICA DE ACOPLADOR	45
2.1 Introdução	45
2.1.1 Interação com o Campo Evanescente	46
2.1.2 Fabricação	53

3. ACOPLADOR	65
3.1 Introdução	65
3.2 Modelo Teórico	69
3.3 Resultados Experimentais	76
3.3.1 Montagem do Acoplador	76
3.3.2 Caracterização Óptica do Acoplador	77
3.3.3 Multiplexador Óptico	82
3.3.4 Atenuador Óptico	86
4. ACOPLADORES QUE PRESERVAM A POLARIZAÇÃO DA LUZ	89
4.1 Introdução	89
4.1.1 Fibras que Mantêm a Polarização da Luz	90
4.1.2 Acoplador que Mantém a Polarização da Luz (AMP)	95
4.1.2.1 Orientação da Fibra ao Microscópio	95
4.1.3 Caracterização Óptica do Acoplador	100
5. DISTRIBUIDOR ESTRELA POR TROCA IÔNICA	105
5.1 Introdução	105
5.2 Projeto do DET	107
5.3 Fabricação dos DET's	110
5.3.1 Fundamentos de Troca Iônica	110

5.3.2 Fabricação	114
5.3.2.1 Determinação das condições de Troca Iônica	114
5.3.2.2 Fotogravação	117
5.3.2.3 Troca Iônica por Difusão Térmica	122
5.3.2.4 Aplicação de Campo	124
5.3.2.5 Processamento de Bordas	134
5.3.3 Caracterização Óptica	138
5.3.3.1 Caracterização Óptica dos Guias de Onda Superficiais	138
5.3.3.2 Caracterização Óptica dos Guias de Onda Enterrados	140
5.3.3.3 Discussão	141
6. CONCLUSÃO	143
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149

Capítulo I

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Em consequência do avanço tecnológico, as perdas das fibras ópticas estão sendo reduzidas aos seus limites mínimos. Consequentemente, os enlaces ópticos estão se tornando mais longos e complexos. Na área de telecomunicações, a implementação de um sistema a fibra óptica requer a realização de inúmeras operações sobre o sinal óptico durante o seu trajeto na fibra, seja modulando, amplificando, multiplexando, dividindo, filtrando, reunindo ou controlando o estado da polarização do sinal óptico transmitido.

Existem basicamente dois métodos de interação com o sinal óptico que se propaga numa fibra :

- método dos dispositivos discretos
- método dos dispositivos “in line”

No primeiro método, dos dispositivos discretos, o sinal é retirado da fibra e lançado em algum componente discreto. Este executa a operação desejada sobre o sinal que, posteriormente, é reintroduzido na fibra. Dentre as técnicas utilizadas para produzir dispositivos discretos destacamos a técnica de deposição (na qual um filme fino de índice de refração maior é depositado sobre o substrato), a técnica de troca iônica, a técnica de difusão térmica, a técnica de implantação de íons e a técnica epitaxial (onde uma camada de material similar ao do substrato é crescido epitaxialmente sobre um cristal). Cada técnica tem vantagens e desvantagens.

No segundo método, dos dispositivos “in line”, a interação com a luz propagante é feita durante o seu trajeto normal, sem sua extração do interior da fibra. Isso significa que o sinal nunca perde as condições de guiamento e não sofre perdas decorrentes de sua saída e entrada na fibra. Nesse caso, todo o processamento é executado interagindo com o campo evanescente da fibra ou seja, acessando a parte de luz presente fora do núcleo da fibra, numa região limitada de sua casca. Os

dispositivos fabricados, segundo este método, são os denominados dispositivos “in line”.

Entre as várias formas de acessar o campo evanescente de uma fibra óptica monomodo, para fabricação de dispositivos “in line”, destacamos três :

- ataque químico
- fusão
- polimento

Pela técnica do ataque químico remove-se quimicamente, em torno de toda a fibra, uma quantidade de casca suficiente para expor parte do campo evanescente.

Pela técnica de fusão, a fibra é aquecida à temperatura de amolecimento da sílica enquanto é distendida. Esta distensão causa a diminuição do diâmetro da fibra e de seu núcleo que, não conseguindo mais confinar o modo propagante, expõe o campo evanescente à ação externa. Esta técnica impõe restrições ao perfil de índice de refração das fibras utilizadas.

Finalmente a técnica de polimento, que constitui um dos dois temas desta Tese, consiste em se desbastar parte da casca da fibra, em apenas um de seus lados, de

forma a expor o campo evanescente e gerar um dispositivo com mais baixa perda em relação às técnicas anteriormente citadas.

A técnica de interação com o campo evanescente possibilita a confecção, com baixas perdas, de inúmeros dispositivos, a fibra, de interesse para telecomunicação.

Esta Tese explora o método “in line” e o método de elementos discretos para confeccionar dispositivos ópticos para telecomunicação. Para os dispositivos “in line” utilizou-se a técnica de polimento para confeccionar acopladores ópticos convencionais, acopladores ópticos que mantêm o estado de polarização da luz incidente, atenuadores e WDM's (Wavelength Division Multiplexer). A versatilidade no uso de qualquer tipo de fibra para a confecção dos dispositivos, as baixíssimas perdas de inserção, e a possibilidade de fabricar uma ampla gama de dispositivos "in line" utilizados em telecomunicação motivaram a escolha da técnica de polimento para confecção dos dispositivos “in line”.

No método dos dispositivos discretos utilizou-se a técnica de Troca Iônica para produzir os DET's (Distribuidor Estrela por Troca iônica). A escolha desta técnica foi motivada pela simplicidade da técnica, pelo seu baixo custo e pela facilidade de fabricação em massa.

1.2 Bibliografia anotada

1.2.1 Técnica de Polimento

O estabelecimento da técnica de polimento para fabricação de acopladores ópticos deu origem a inúmeros dispositivos que, por explorarem a interação direta com o sinal óptico transmitido, apresentam alta eficiência e baixas perdas sendo, por isso, considerados extremamente promissores para telecomunicações e sensores. Dentre os dispositivos ópticos mencionados destacamos, além dos acopladores com fibras convencionais e com fibras de polarização mantida, amplificadores, chaves ópticas, filtros, moduladores a fibra, polarizadores e multiplexadores ópticos.

Os acopladores fabricados pela técnica de polimento, utilizando fibras multimodo, foram inicialmente desenvolvidos por TSUJIMOTO ^[1], em 1978, para aplicações em duplicação de enlaces de transmissão em $\lambda = 0,83 \mu\text{m}$. Nesse trabalho o autor relata a fabricação de acopladores multimodo com 3 dB de razão de acoplamento e perdas menores que 0,5 dB, apresentando posteriormente ^[2] o modelamento teórico para esses dispositivos.

Pouco tempo depois, em 1980, BERGH, KOTTLER e SHAW ^[3] publicaram, em Stanford, o primeiro trabalho sobre fabricação de acopladores monomodo. Os recursos desenvolvidos foram imediatamente aplicados na confecção dos primeiros polarizadores a fibra ^[4]. Os dois primeiros dispositivos, utilizando fibras monomodo em $\lambda=633$ nm e $\lambda=1500$ nm, geraram polarizadores de alto grau de polarização, com razão de extinção de polarização que atingiu 60 dB.

Em 1981, PARRIEAUX ^[5], na França, demonstrou que a seletividade em comprimento de onda requerida para telecomunicações poderia ser alcançada nos acopladores direcionais, por polimento, confeccionados com duas fibras monomodo de diferentes características de dispersão. Tais dispositivos permitiriam cerca de 10 canais com separação de 40 nm nas futuras gerações de sistemas de telecomunicações.

Em 1982 e 1983, após a experiência de BERGH, DIGONNET e SHAW ^[6], estes autores apresentaram uma detalhada análise dos acopladores monomodo, por polimento, com razão de acoplamento sintonizável entre 0 e 100 % e estudaram as características de multiplexação em comprimentos de onda dos dispositivos desenvolvidos ^[7]. Os resultados foram promissores uma vez que os primeiros acopladores, embora limitados à região do visível e do infravermelho próximo do espectro de luz, apresentaram perdas baixas, tunelamento contínuo, independência

de polarização e alta diretividade. Já os multiplexadores, mostraram que este tipo de dispositivo pode apresentar perdas menores que 0,1 dB, tem excelentes características de razão de extinção (isolação de canal, como multiplexador, superior a 50 dB), sendo totalmente independente da polarização do sinal transmitido. Nesse trabalho foi demonstrada a separação de canais da ordem de 3,5 nm, antecipando possibilidades de obtenção de separação de canal da ordem de dezenas de Angstroms, dados estes bastante animadores em termos de telecomunicações.

Em sua Tese de Doutorado, BERGH^[8] ampliou seu campo de trabalho dissertando sobre componentes com aplicação direta nos giroscópios a fibra, descrevendo os acopladores monomodo sintonizáveis de 0 a 100 %, os polarizadores com extinção de polarização superior a 60 dB , além dos controladores de polarização. Todos os dispositivos foram desenvolvidos para atuarem em $\lambda = 600$ nm.

A otimização do processo ficou a cargo de NEWTON *et al.*^[9] que confeccionaram o primeiro acoplador direcional de múltiplas entradas usando, para tanto, um conjunto de canais definidos litograficamente num substrato de silício que garantiram o posicionamento preciso de uma série de conjuntos de fibras monomodo. O dispositivo desenvolvido, além das figuras de mérito inerentes aos acopladores por polimento, apresentou excelente uniformidade na potência de saída, podendo ser

usado na formação de um acoplador ajustável de múltiplas entradas. A nova técnica vislumbrou a produção em massa para os acopladores por polimento.

JACCARD ^[10], em 1984, desenvolveu uma técnica de produção em massa e de baixo custo, de acopladores monomodo, na mesma linha do trabalho anterior, usando litografia. Neste trabalho, a exemplo dos anteriores, o autor citou razões de acoplamento que variaram entre 0 e 100 %, perdas menores que 0,5 dB e alta diretividade dos dispositivos produzidos.

Finalmente em 1990, SYLVESTER *et al.*^[11] relataram um processo de automação para a fabricação dos acopladores ópticos por polimento. Os resultados indicaram que acopladores ópticos de alta precisão, por polimento, são passíveis de serem obtidos pelo método proposto.

A seguir, faremos uma abordagem sucinta da bibliografia sobre alguns dispositivos ópticos que derivaram da técnica de polimento.

1.2.1.1 Acopladores não Recíprocos

As redes ópticas locais são usadas para agilizar a comunicação em sistemas onde existe grande número de estações. Para tanto, os acopladores ópticos têm papel fundamental ^[12]. A otimização do número de estações nestes enlaces requer que a eficiência de acoplamento da luz injetada no enlace seja próxima da unidade enquanto a da luz removida seja mínima ^[13]. Como este processo de otimização está limitado pelo princípio da reciprocidade ^[14], o qual requer que a potência injetada em cada estação seja igual à potência removida para o receptor local, foi produzido o primeiro acoplador direcional não recíproco. O dispositivo, variável e fabricado pela técnica de polimento, faculta o acoplamento por campo evanescente entre fibras monomodo e multimodo. No acoplador não recíproco, a luz é transmitida, quase totalmente, na fibra monomodo enquanto pouca potência é acoplada em apenas alguns dos modos da fibra multimodo. A alternativa do acoplador não recíproco foi seguida pela implementação de uma rede local simples, usando os referidos acopladores, o que gerou um aumento considerável no número de estações em relação a um enlace convencional ^[15].

A operação dos acopladores não recíprocos foi também descrita por BOUGHTON *et al.* ^[16] que incorporaram tais dispositivos em sistemas de rede local, discutindo as vantagens obtidas com estas aplicações.

1.2.1.2 Acopladores que Mantêm o Estado de Polarização da Luz

Falar de uma fibra que mantém a polarização da luz corresponde a falar de uma fibra que preserva o estado de polarização linear da luz que a percorre. Este tipo de fibra é utilizado em sistemas ópticos coerentes, na ligação laser/modulador eletro-óptico baseado em Niobato de Lítio e em sensores interferométricos [17]. Os acopladores ópticos que, como a fibra, preservam o estado de polarização da luz, são componentes fundamentais a quaisquer desses sistemas, sendo fabricados tanto pela técnica de fusão [18,19] como pela técnica de polimento [20]. Para ambas as técnicas, o requisito mais importante é que os referidos dispositivos sejam capazes de reunir ou dividir sinais ópticos que provêm dessas fibras especiais, sem degenerar o grau de polarização do sinal. Um exemplo deste dispositivo é apresentado por CARRARA *et al.* [21] que, em 1986, desenvolveram uma técnica eficiente para obtenção de acopladores que mantêm a polarização da luz. Tais dispositivos tiveram aplicação direta nos giroscópios ópticos. O trabalho de CARRARA *et al.* [21] cita extinção de polarização reproduzível e melhor que 28 dB.

Já na técnica de fusão, na qual é mais difícil a orientação dos eixos principais das duas fibras individuais, os melhores resultados apresentados por ABEBE [22] são inferiores aos alcançados pela técnica de polimento. O autor cita extinção de polarização entre 15 e 20 dB para os acopladores.

1.2.1.3 Amplificadores

A compensação das perdas inerentes a um sistema óptico monomodo pode ser feita através dos amplificadores ópticos. Estes dispositivos devem ser compatíveis com as fibras monomodo e de preferência devem ser fabricados diretamente sobre a fibra, para evitar perdas por inserção que degradem as características do sistema.

Um trabalho relevante na área de amplificação direta foi desenvolvido por SORIN *et al.*^[23]. Estes, utilizando uma única banda de acoplador por polimento, obtiveram amplificação de sinal superior a 20 dB ao usar Rhodamine B sobre o campo evanescente do sinal propagante e do sinal de bombeio. Neste trabalho, a luz de bombeio e o sinal caminham juntos e a amplificação ocorre quando os campos evanescentes de ambos penetram na solução "dye". Do mesmo autor^[24], existe a publicação de um absorvedor monomodo saturável que usa o campo evanescente do sinal guiado, para obter uma dependência não linear do sinal transmitido, em função da potência óptica. Esta não linearidade pode ser usada em "loops" ativos a fibra para prevenir o alargamento de pulso. Amplificação de 25 vezes, em $\lambda = 633$ nm, foi também obtida usando um laser de argônio em $\lambda = 488$ nm e com 50 mW de potência de bombeio^[25]. Entretanto, o ganho destes dispositivos é muito sensível ao índice de refração da solução "dye" e, conseqüentemente, a sua temperatura.

1.2.1.4 Chaves Ópticas

A chave óptica "in line" é um componente óptico relevante, cujo desenvolvimento vem sendo perseguido por inúmeros pesquisadores. Dentre eles destacamos o trabalho de MOLL e DOLFI^[26] que, em 1985, descreveram o efeito de chaveamento termoóptico de um acoplador multimodo fabricado pela técnica de polimento, com o qual obtiveram variações de acoplamento de 4 a 28 dB, com perdas menores que 0,2 dB.

Usando a mesma técnica de polimento MARKATOS *et al.*^[27], em 1987, desenvolveram uma chave óptica controlada termicamente, onde a potência acoplada é proporcional à corrente aplicada. Com o dispositivo proposto, o autor obteve chaveamento de 84% na frequência de 1 kHz e 100% em 500 Hz.

1.2.1.5 Filtros

A utilização efetiva da ampla largura de banda disponível nas fibras ópticas monomodo requer o desenvolvimento de componentes que operem numa frequência específica e sejam transparentes às demais. Esses componentes são os filtros

ópticos que, fabricados sobre a própria fibra, são dispositivos extremamente úteis numa linha óptica. Inúmeros trabalhos sobre filtros vêm sendo desenvolvidos pelas mais diversas técnicas.

CHUBB *et al.*^[28] mostraram a possibilidade de incorporar grades de difração diretamente sobre a fibra. A grade foi definida holograficamente, podendo ter inúmeras configurações.

RUSSELL e ULRICH^[29] publicaram um trabalho onde descreveram e analisaram um espectrômetro feito diretamente sobre uma banda de acoplador, por polimento.

O dispositivo era provido de uma grade de fotoresiste formada na superfície polida da fibra e possibilitou resolução de $\Delta\lambda \approx 1$ nm.

Usando o acoplador por polimento, numa de suas inúmeras aplicações na fabricação de dispositivos "in line", WHALEN e WALKER^[30], da AT&T Bell, desenvolveram um acoplador com duas fibras de raios diferentes que apresentou características de filtro, centrado em 1,22 μm , com largura de banda de 90 nm, eficiência pico a pico de 60 % e perda de 0,2 dB.

Enquanto isso, SORIN e SHAW^[31] usavam uma grade metálica de alumínio sobre o campo evanescente de uma fibra monomodo para pesquisar o acoplamento de

retorno do guia. O dispositivo atuou como filtro passa banda para a luz refletida e como filtro passa alta, para luz transmitida. A otimização deste dispositivo implicou na substituição da grade metálica de linhas paralelas e período constante, por uma grade de linhas divergentes ^[32]. Com este trabalho, foi desenvolvido um filtro de reflexão sintonizável, centrado em 1300 nm. Sua largura de banda foi de aproximadamente 1 nm e banda de sintonização de 65 nm. O filtro foi usado para sintonizar um laser semiconductor multimodo, no intervalo de 26 nm.

Eliminar a presença da grade metálica do dispositivo para baixar as perdas e otimizar a resposta dos filtros foi o principal objetivo de RAGDALE *et al.* ^[33] que descreveram, em detalhes, a confecção de uma grade holográfica definida diretamente sobre a banda de acoplador, a exemplo de PARK *et al.* ^[34] e ROWE *et al.* ^[35]. Os autores, com modificações simples de processamento, conseguiram produzir filtros com largura de banda muito estreita (0,04 nm). Tais dispositivos têm inúmeras aplicações em sistemas a fibra óptica.

Em seu trabalho de 1987, MILLAR *et al.* ^[36] descreveram o uso de uma camada de alto índice de refração colocada sobre uma banda de acoplador polido, para fazer um atenuador fixo ou sintonizável. O referido filtro apresenta um espaçamento de canal de 13 nm com 20dB de isolamento e perda entre 1 e 4 dB.

Usando o mesmo recurso do acoplamento do campo evanescente com uma camada altamente multimodo, JOHNSTONE, *et al.*, em 1992 ^[37], conseguiram desenvolver filtros ópticos, usando filmes depositados ou uma camada fina de niobato de lítio polido. Os autores conseguiram demonstrar resolução de comprimento de onda de 1 nm, eficiência de acoplamento dos canais selecionados de 95% e perdas dos canais transmitidos inferior a 0,2 dB.

Otimizando o trabalho de JOHNSTONE, W., MOODIE D.G^[38] demonstrou a possibilidade de sintonização de filtros numa faixa de algumas centenas de nanometros.

1.2.1.6 Modulador

Os Moduladores Acústicos de Fase (MAF) são amplamente utilizados em sistemas ópticos coerentes e em sistemas "mode-locked". Sua confecção, diretamente sobre a fibra, elimina as perdas decorrentes de extração e retorno do sinal à fibra, o que justifica plenamente o esforço que vem sendo investido no desenvolvimento dos moduladores "in line".

O MAF para fibras multimodo e monomodo foi proposto pela primeira vez em 1974, por DAVIES ^[39], com aplicações em áreas como telemetria, interferômetros, giroscópios a fibra, operando na frequência de 100 kHz.

Em 1986, LAZNICKA *et al.*^[40], da Litton Systems, publicou uma patente onde descreveu o processo de confecção de um modulador óptico de fase, fabricado diretamente sobre a fibra.

Ainda em 1986, KANDALL ^[41] demonstrou o processo de fabricação de um polarizador/modulador de amplitude “in line” que usou as propriedades birrefringentes de um cristal líquido colocado sobre o campo evanescente de uma fibra monomodo. O autor cita extinção de polarização mínima de 45 dB e resposta em frequência de modulação de poucos kHz.

Como resultados mais recentes, podemos citar os trabalhos de PATTERSON *et al.*^[42] e PHILLIPS *et al.*^[43]. No primeiro deles, os autores produziram um transdutor de ZnO que, colocado em contato com a fibra, operou na frequência de 416 MHz, com largura de banda de 14 MHz, enquanto no segundo os autores, usando um dispositivo acústico-óptico preso firmemente a fibra, conseguiram simplificar o projeto de uma cavidade laser, gerando pulsos de 200 picossegundos de duração, numa frequência de 417 MHz.

Em 1991 ^[44], WILKINSON, M. propôs o primeiro modulador de amplitude “in-line”, usando uma banda de acoplador e um filme de polímero com propriedades eletro-ópticas. O autor obteve baixas perdas e profundidade de modulação que poderá ser melhorada com o uso de outros tipos de polímeros.

Concomitantemente ao trabalho de Wilkinson e usando também uma banda de acoplador recoberta com um filme de polímero eletro-óptico, JOHNSTONE, W., em 1991 ^[45], construiu um modulador com perda menor que 1 dB.

Pouco tempo depois, em 1992 ^[46], FAWCETT, G. desenvolveu um modulador “in-line” que usava o campo evanescente da fibra para acoplar num filme de polímero eletro-óptico. Com este experimento o autor conseguiu medir profundidades de modulação superiores a 16 dB e perdas inferiores a 0,6 dB.

1.2.1.7 Multiplexador

O rápido avanço na implantação dos sistemas de comunicação por fibras ópticas levou ao desenvolvimento de novas técnicas que possibilitaram o aumento da capacidade de transmissão e o uso otimizado da ampla largura de banda disponível

nas fibras. Dentre estas técnicas podemos destacar a multiplexação em comprimento de onda que consiste em combinar (ou separar), em uma única fibra (em várias fibras), canais de comunicação que operam em comprimentos de ondas distintos. Uma das alternativas para a construção de multiplexadores consiste em se utilizar a seletividade em λ da razão de acoplamento dos acopladores monomodo.

Dentro deste contexto, DIGONNET e SHAW ^[7] apresentaram, em 1983, um dos trabalhos precursores de multiplexação em comprimento de onda, onde demonstraram separação entre canais da ordem de 35 nm, em dispositivos com 6 mm de comprimento de interação.

Outro trabalho abrangente que examina diversas configurações de multiplexação em λ foi apresentado por CHEUNG ^[47].

Por fim, diversificando ainda mais as aplicações dos multiplexadores vemos, em publicação da OFC 92, o trabalho de DELEVAQUE ^[48] que, utilizando a técnica de polimento, confeccionou um multiplexador feito com a própria fibra de Érbio para ser utilizado nos amplificadores a fibra. O autor comprova altos ganhos no amplificador (40 dB), com apenas 25 mW de potência de bombeio.

1.2.1.8 Polarizador

Os sensores interferométricos que utilizam fibras convencionais são fortemente afetados pela presença de dois modos de polarização na fibra. O mesmo ocorre com os giroscópios a fibra, onde a presença de mais de um modo de polarização gera erros de fase. Para eliminar problemas deste tipo, foram desenvolvidos os polarizadores a fibra. O primeiro polarizador desta natureza ^[49] usou a técnica de polimento para acessar o campo evanescente da fibra e a técnica de filmes finos para atenuar a polarização indesejada. Uma grande vantagem deste dispositivo é sua inserção direta, na linha óptica, sem muitas perdas. O desempenho deste dispositivo foi explicado, de forma qualitativa, pelo autor daquele trabalho, que obteve uma extinção máxima de polarização de 14 dB. O dispositivo apresentou altas perdas, devido à interação direta do campo evanescente com o filme metálico.

Em 1983, GRUCHMANN *et al.* ^[50], introduzindo uma camada “buffer” de CaF_2 entre a superfície polida e o metal depositado, anteriormente descrito, conseguiram extinção de polarização de 45 dB.

Seguindo o mesmo esquema de trabalho, FETH e CHANG ^[51] mostraram resultados relevantes, ao apresentarem polarizadores com 47 dB de extinção de polarização.

Em trabalho recente, KUTSAENKO, V. [52] mostrou as propriedades de dispositivos envolvendo acoplamento do campo evanescente com uma camada multimodo recoberta com filme metálico. Neste trabalho, o autor mostra como controlar a posição dos modos TE e TM, de forma independente.

1.2.2 Técnica de Troca Iônica

Acopladores, Multiplexadores, Demultiplexadores, e Distribuidores de Potência Óptica são componentes básicos para processamento de sinal, rede de serviços, sensores ópticos e para uma variada gama de aplicações em telecomunicações.

Uma das técnicas utilizadas na fabricação destes dispositivos é a Técnica de Troca Iônica (TIO). Esta técnica, cuja descrição detalhada foi apresentada por RAMASWAMY e SRIVASTAVA^[53], consiste em introduzir um substrato vítreo, rico em íons de sódio, em um sal fundido do tipo $\text{NaNO}_3 + \text{AgNO}_3$. Os íons Na^+ presentes no vidro, quando submetidos a uma elevação de temperatura, têm sua energia de ativação elevada, o que favorece a sua fuga do substrato e consequente substituição por íons Ag^+ com maior polarizabilidade. Este processo resulta num aumento local do índice de refração que faculta o guiamento de luz.

Utilizando esta técnica, ISAWA T. e NAKAGONE H., em 1972 ^[54], fabricaram guias de onda dopados com íons de Tl^+ , com perdas menores que 0,1 dB/cm.

Em 1978, CHARTIER G.H. *et al.* ^[55], aplicando campo elétrico para acelerar o processo de troca, produziram guias de onda pela troca de íons de sódio por íons de prata, no vidro de *soda lime*. Os referidos autores conseguiram modificar o processo de troca iônica convencional, de forma a controlar o perfil do guia de onda gerado, para melhor adaptá-lo às características geométricas e de distribuição de índice da fibra. Verificaram ainda que a presença do campo elétrico reduz o tempo de difusão e permite que o perfil de índice possa ser modificado de forma a se adaptar tanto a fibras multimodo como a fibras monomodo.

A dificuldade de gerar um guia de onda, com dimensões e características compatíveis com a fibra multimodo, foi resolvido por CHARTIER *et al.* em 1977 ^[56]. Estes, utilizando um método alternativo, conseguiram reduzir o tempo de processamento dos guias por um fator de 3000. Em trabalho posterior (1980), o mesmo autor aprofundou seus estudos e conseguiu relacionar a profundidade dos guias obtidos, com a largura dos guias desenhados na barreira metálica. Mostrou como os perfis de índice de refração gerados podem ser enterrados, de forma que seu máximo fique dentro do substrato. Isto resultou em redução considerável das perdas dos guias ópticos gerados ^[57].

A otimização deste trabalho veio, em 1983, com EGUCHI R.G. *et al.*^[58] que, associando a técnica de recozimento após a troca, obtiveram guias de onda com perdas da ordem de 0,068 dB/cm.

Em 1988, HAUX D. *et al.*^[59], dirigindo seus estudos para redes locais, desenvolveram um distribuidor estrela 1 x 16 para o qual utilizou um vidro com baixa quantidade de impurezas e um processo de troca iônica em duas fases. Na primeira fase, o guia foi gerado por troca de Na⁺ por Ag⁺ e na segunda fase, após remoção da barreira metálica, uma nova troca foi feita, sob a ação de um campo elétrico. Com este artifício, o autor conseguiu enterrar os guias de onda e abaixar as perdas do dispositivo.

Outro parâmetro importante, a característica de polarização dos guias de onda fabricados pela técnica de troca iônica, foi medida em 1988, por SEKI M. *et al.*^[60]. Os autores mediram mais de 26 dB de razão de extinção entre os modos TE e TM e perdas inferiores a 1 dB, identificando este dispositivo como passível de manter a polarização.

Em 1988, DE BERNARDI^[61] analisou as propriedades ópticas da troca iônica de K⁺ - Na⁺, em guias de onda confeccionados em vidro *soda lime*. O autor discutiu a importância de tensões estruturais na mudança de índice superficial, em função do

tempo e temperatura de troca. Este trabalho serviu de base à fabricação de multiplexadores ópticos em 1,3 e 1,55 μm ^[62] e dispositivos sensíveis à polarização.

Usando o mesmo dopante, NAJAFI, em 1989^[63], desenvolveu divisores de potência óptica monomodo, usando configuração de dispositivo em Y.

Em 1990, JANET JACKEL *et al.*^[64] desenvolveram vidros cuja aplicação em chaveamento óptico ficou patente, enquanto TARVONEN, A. *et al.*, em 1991^[65], propuseram uma configuração alternativa para os divisores de potência óptica. Os autores, numa visão inovadora, propuseram um WDM assimétrico em configuração

Mach Zehnder.

1.3 Principais Contribuições

A partir da pesquisa que consubstanciou a presente Tese foi estabelecido, no país, o processo de fabricação e caracterização de dispositivos ópticos a fibra e de distribuidores ópticos do tipo estrela, pelas técnicas de polimento e troca iônica, respectivamente. Ao contrário da maioria dos trabalhos anteriormente citados, que descrevem dispositivos caracterizados em 630 nm, os dispositivos desenvolvidos, nesta pesquisa, operam em 1300 nm ou 1550 nm, ou seja, na janela de interesse de telecomunicações. O domínio da tecnologia de interação com o campo evanescente das fibras ópticas, de forma não destrutiva, e da técnica de troca iônica, facultou o desenvolvimento de dispositivos ópticos relevantes à área de telecomunicações e sensoriamento. Dentre estes dispositivos destacamos :

1. Acoplador óptico com fibra convencional ^[66]
2. Acoplador óptico que mantém o estado linear de polarização da luz (processo rápido de orientação da fibra) ^[67]
3. Multiplexador óptico, em comprimento de onda ^[68]
4. Atenuador óptico variável ^[69]
5. Distribuidor estrela por troca iônica 1x4, 1x8, 1x16 ^[70]

Finalmente, numa tentativa de simular a extração de sinal de um cabo já implantado para comunicação local, acessou-se uma fibra do interior de um cabo óptico para, sem interromper a transmissão, produzir um acoplador "pick-off in line". Tais acopladores são utilizados como terminais leitores em sistemas "databus" de terminais múltiplos ou para monitoração da eficiência de acoplamento da fonte na fibra.

Como consequência imediata do desenvolvimento desta pesquisa ressaltamos a transferência da técnica de fabricação dos dispositivos ópticos, por polimento, para o IEAv do CTA (Programa Aeroespacial Brasileiro). Outro benefício relevante foi a interação que se estabeleceu, através de convênio, com o Centro de Componentes Semicondutores (CCS) / Unicamp. Dentro deste convênio, fabricaram-se as máscaras do DET, o que facultou, ao CPqD, a produção do primeiro dispositivo planar, totalmente brasileiro.

1.4 Resumo do Trabalho

O Capítulo II desta tese abordará a técnica de interação com o campo evanescente e descreverá, com detalhes, a técnica de polimento para obtenção e caracterização da Unidade Básica do Acoplador, que passará a ser tratada como UBA. O Capítulo III abrangerá os fundamentos teóricos dos Acopladores Ópticos a fibra, descreverá o processo de confecção e caracterização dos Acopladores, WDM e Atenuadores Ópticos, além de rever e comparar os resultados obtidos pelas várias técnicas mencionadas. O Capítulo IV descreverá o processo de fabricação dos Acopladores Ópticos que preservam o estado de polarização da luz e o método de caracterização utilizado, bem como os resultados obtidos. O Capítulo V mostrará a relevância dos Distribuidores Estrela no cenário de telecomunicações. Ainda neste capítulo será descrito, em detalhes, o processo de confecção e caracterização óptica do dispositivo DET, em comparação com os resultados apresentados na literatura. Finalmente, o Capítulo VI apresentará a conclusão da pesquisa, com uma avaliação do trabalho desenvolvido e a gama de dispositivos que derivam das técnicas utilizadas, suas aplicações, benefícios e possibilidades futuras de aprimoramentos.

Capítulo II

2. UNIDADE BÁSICA DE ACOPLADOR

2.1 Introdução

A interação com a radiação óptica que se propaga numa fibra, pela técnica de polimento, foi desenvolvida para confeccionar acopladores ópticos direcionais, com fibras monomodo convencionais ^[3]. A técnica consiste na fixação de uma fibra óptica a uma matriz de quartzo que é, posteriormente, desbastada e polida até que apenas alguns micrometros da casca da fibra permaneçam sobre o núcleo, expondo o campo evanescente da radiação.

2.1.1 Interação com o campo evanescente

A resolução das equações de Maxwell, aplicadas as fibras, ópticas mostra que os campos elétricos variam harmonicamente, com o tempo, na região de guiamento (núcleo) e decaem, quase exponencialmente fora dessa região, concentrando-se no núcleo e penetrando parcialmente na região da casca ^[71], como na Figura 2.1. Nosso interesse, durante a fabricação da Unidade Básica de Acoplador (UBA), concentra-se na parte de energia que penetra na casca da fibra ou seja, o campo evanescente.

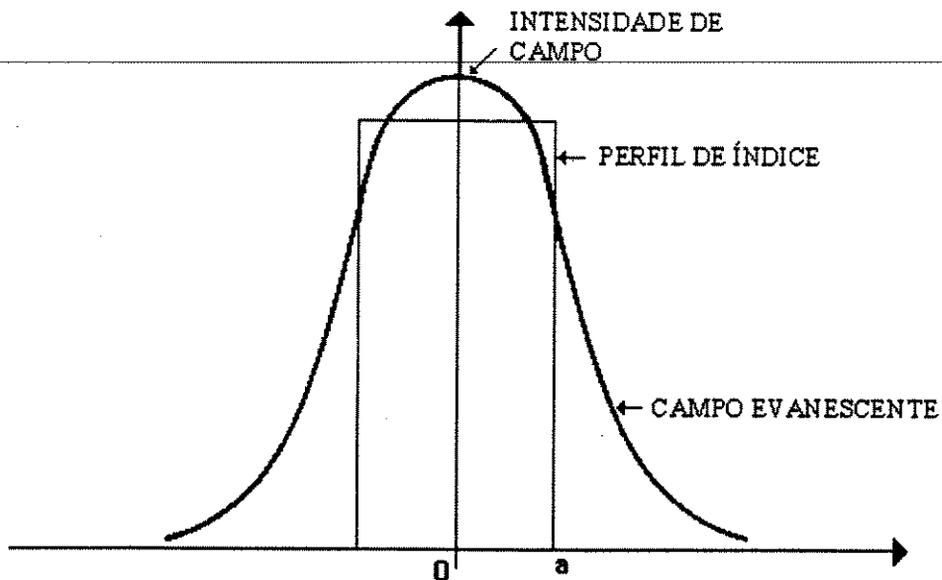


Figura 2.1 - Distribuição de campo de uma fibra monomodo.

Seja a fibra óptica mostrada na Figura 2.2 onde n_1 é o índice de refração do núcleo de raio $r = a$ e n_2 o índice de refração da casca, de raio infinito. A propagação de luz neste meio pode ser entendida, resolvendo-se a equação de onda neste meio.

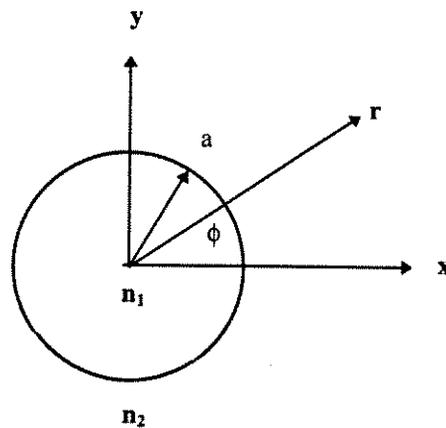


Figura 2.2 - Seção transversal de uma fibra óptica de perfil de degrau (vista de topo).

Se considerarmos uma onda eletromagnética monocromática de frequência ω , propagando-se na direção z , os campos elétrico e magnético podem ser expressos como ^[71]:

$$E = E_0(r, \phi) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.1)$$

$$H = H_0(r, \phi) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

onde β é a constante de propagação.

Partindo das equações de Maxwell, deriva-se a equação de onda para \mathbf{E} e \mathbf{H} e, impondo as limitações e condições de contorno devidas [71], chegam-se às componentes E_r , E_ϕ , E_z , H_r , H_ϕ , H_z dos campos. Inicialmente estabelecem-se as componentes axiais de campo E_z e H_z e a partir delas, deduzem-se as componentes transversais. A seguir, usando uma função tentativa $F = AF_1(r) F_2(\phi) F_3(z, t)$, com dependência em r , ϕ , z e t e o método de separação de variáveis, o sistema é separado em duas equações diferenciais, uma das quais é a equação de Bessel com dependência radial

$$d^2 F(r) / dr^2 + 1/r (d F(r) / dr) + (\kappa^2 - \gamma^2 / r^2) F(r) = 0$$

(2.2)

$$d^2 H(r) / dr^2 + 1/r (d H(r) / dr) + (\kappa^2 - \gamma^2 / r^2) H(r) = 0$$

As constantes κ e γ estão definidas na página seguinte.

Estas são equações diferenciais de segunda ordem, com duas soluções independentes. Precisamos de soluções diferentes para as regiões fora e dentro do núcleo. Dentro do núcleo ($r < a$), onde esperamos um comportamento oscilatório do campo, a solução deve permanecer finita à medida que $r \rightarrow 0$. Usamos, então, a função de Bessel para solução da parte radial de E_z onde $r < a$ e temos:

$$E_z = A J_\nu(\kappa r) e^{i\nu\phi} \tag{2.3}$$

$$H_z = B J_\nu(\kappa r) e^{i\nu\phi}$$

onde $\kappa^2 = k_1^2 - \beta^2$ é a relação entre κ , β e k_1 , sendo J_ν a função de Bessel de 1º tipo e ordem ν , sendo ν um número inteiro e positivo. $k_1 = n_1 k$, onde $k^2 = \omega^2 \epsilon_1 \mu_0$ é o número de onda no vácuo e A e B são constantes.

As soluções externas ao núcleo ($r > a$) devem decair a zero para $r \rightarrow \infty$. A função de Hankel de primeiro tipo $H_\nu^{(1)}$, com seu decaimento quase exponencial é adequada para descrever os modos guiados fora do núcleo da fibra.

$$E_z = C H_\nu^{(1)}(i\gamma r) e^{i\nu\phi} \quad (2.4)$$

$$H_z = D H_\nu^{(1)}(i\gamma r) e^{i\nu\phi}$$

onde $\gamma^2 = \beta^2 - k_2^2$ é a relação entre γ , β e $k_2 = n_2 k$ onde $k^2 = \omega^2 \epsilon_2 \mu_0$. C e D são constantes. A constante de propagação β , de qualquer modo da fibra, fica limitada ao intervalo^[72]

$$n_1 k > \beta > n_2 k \quad (2.5)$$

Definindo os parâmetros^[72]:

$$u^2 = a^2 (k^2 n_1^2 - \beta^2)$$

$$w^2 = a^2 (\beta^2 - k^2 n_2^2)$$

(2.5 a)

a soma quadrática $V^2 = u^2 + w^2$ leva a um outro parâmetro importante, denominado frequência normalizada.

$$V = ak (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.6)$$

Com a ajuda de $u(V)$, podemos calcular a constante de propagação β dos modos guiados e fazendo a relação $(w/V)^2 = b(V)$, ao considerar a aproximação de guiamento fraco $(n_1 - n_2) / n_1 \ll 1$, chega-se ao valor da constante de propagação normalizada b , que é dada por :

$$b \cong [\beta / k - n_2] / [(n_1 - n_2)] \quad \text{ou} \quad (2.7)$$

$$b \cong (n_e - n_2) / (n_1 - n_2)$$

onde $n_e = \beta/k$ é o índice de refração efetivo.

A Figura 2.3 mostra $b(V)$ para 18 modos linearmente polarizados LP^[72].

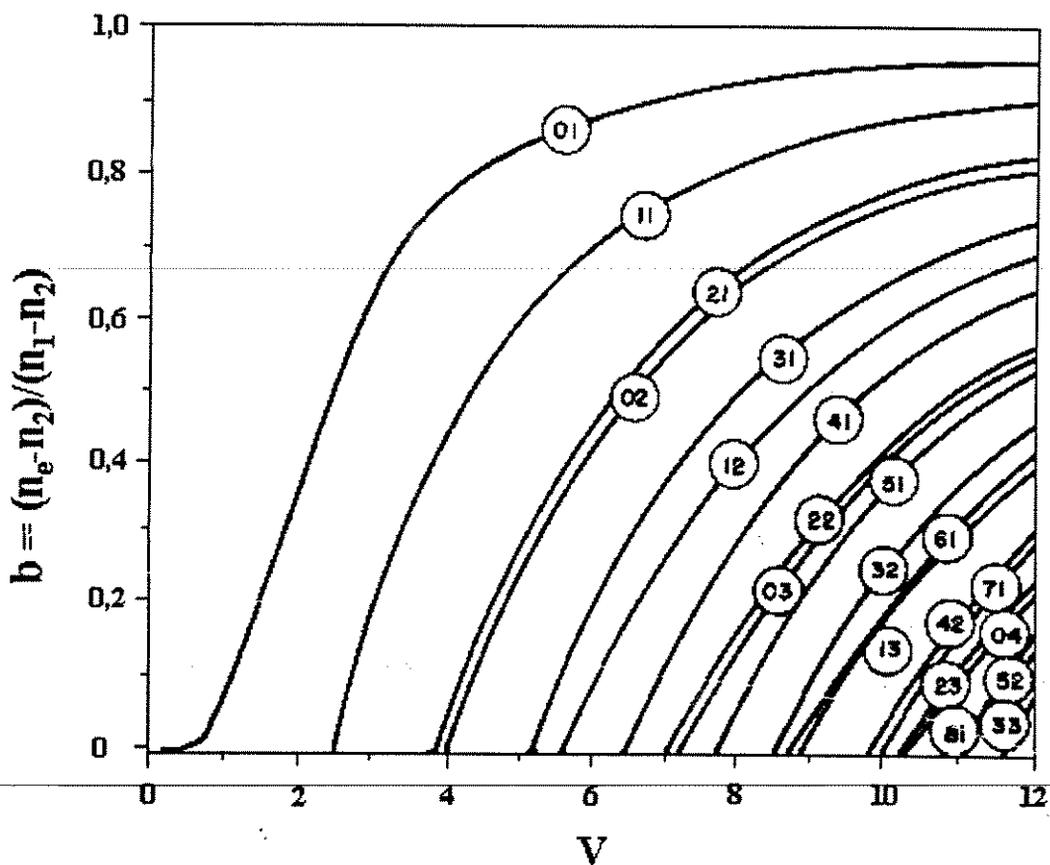


Figura 2.3. - Constante de propagação normalizada b em função da frequência normalizada V [72].

Observa-se que, para valores de $V > 2,405$ existem vários modos guiados. Com a aproximação do V de corte ($V = 2,405$), apenas um modo permanece, o fundamental LP_{01} , e para valores de V ainda menores ($V < 2,405$), o campo do modo fundamental começa a se alargar, transferindo maior parte de sua energia para a casca. Na Figura 2.4, é ilustrada a variação de P_{casca} / P em função de V . P_{casca} e P representam a potência na casca e a potência total, respectivamente [72].

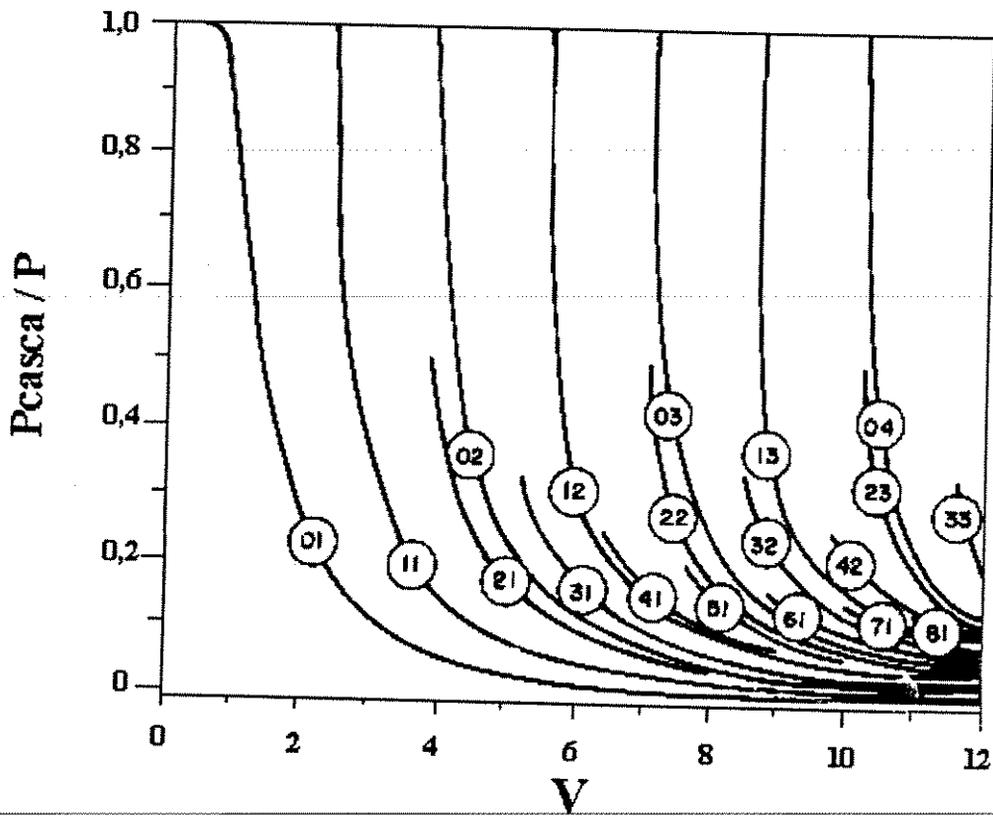


Figura 2.4 - Potência que propaga na casca x frequência normalizada $V^{[72]}$

A Figura 2.5 mostra os índices de refração de cada região da UBA. Nesta figura, n_4 representa o índice de refração do líquido em contato com a parte polida da casca.

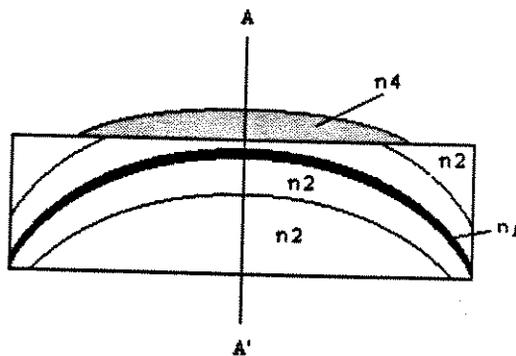
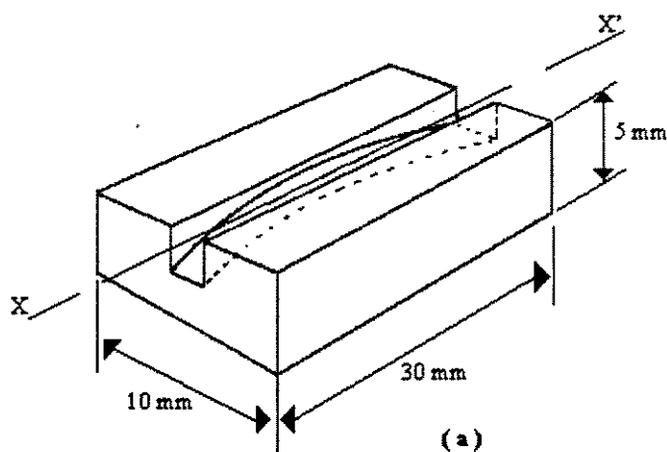


Figura 2.5 - Índices de refração das várias regiões da UBA.

2.1.2 Fabricação

A fabricação do acoplador é iniciada pela confecção da UBA. Esta consiste de uma matriz de quartzo fundido, de dimensões 30 x 10 x 5 mm, cujas faces maiores devem ser perfeitamente paralelas. Nesta matriz é feito, ao longo de seu comprimento, um sulco de dimensões compatíveis com as da fibra (140 μm) (Fig. 2.6 (a)) e com um raio de curvatura R pré-determinado que, no nosso caso, foi $R = 25 \text{ cm}$ (Fig. 2.6 (b)). Para confeccionar este sulco, foi necessária a construção de um equipamento de corte especial.



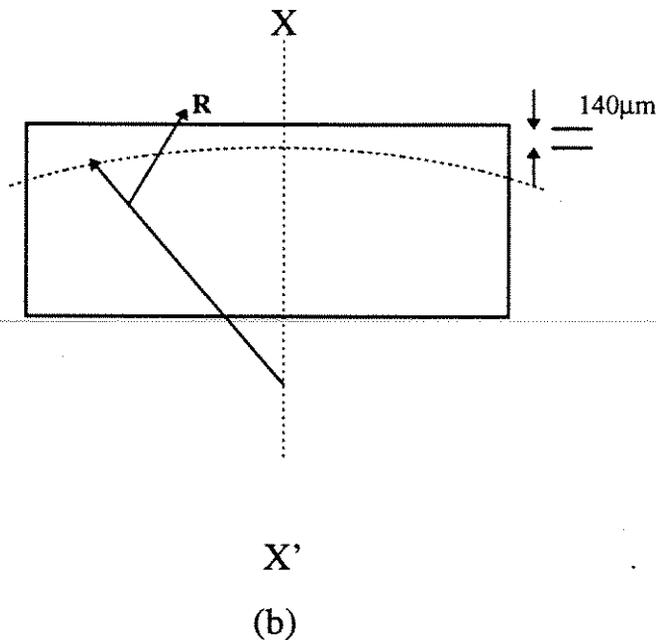


Figura 2.6 - (a) Matriz de quartzo com sulco, (b) corte XX'.

A finalidade desta curvatura é manter a região da fibra que fica nas extremidades da matriz, longe da superfície de desbaste, para evitar fraturas e rompimento da fibra ante a ação do abrasivo e controlar o comprimento da região que expõe o campo evanescente, ou seja, da região de interação. Este sulco deve ser submetido a um desbaste ("etch") de ácido fluorídrico (HF) (5%) durante 3 minutos. Este "etch" remove partículas remanescentes de quartzo que, tendo a mesma dureza que a fibra, podem rompê-la quando esta for aí acomodada. Na maioria dos dispositivos foi utilizada fibra Telebrás monomodo em $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$, com $130 \mu\text{m}$ de diâmetro de casca e $5 \mu\text{m}$ de diâmetro de núcleo, sendo o $\Delta n = 0,4 \times 10^{-2}$. A etapa seguinte é a remoção, no centro da fibra, de 25 mm de seu revestimento (Fig. 2.7 (a)), seguida

de sua fixação à matriz de quartzo, com resina (Epotek 301-2) (Fig. 2.7 (b)).

Usou-se, para isto, o dispositivo apresentado na Figura 2.7 (c).

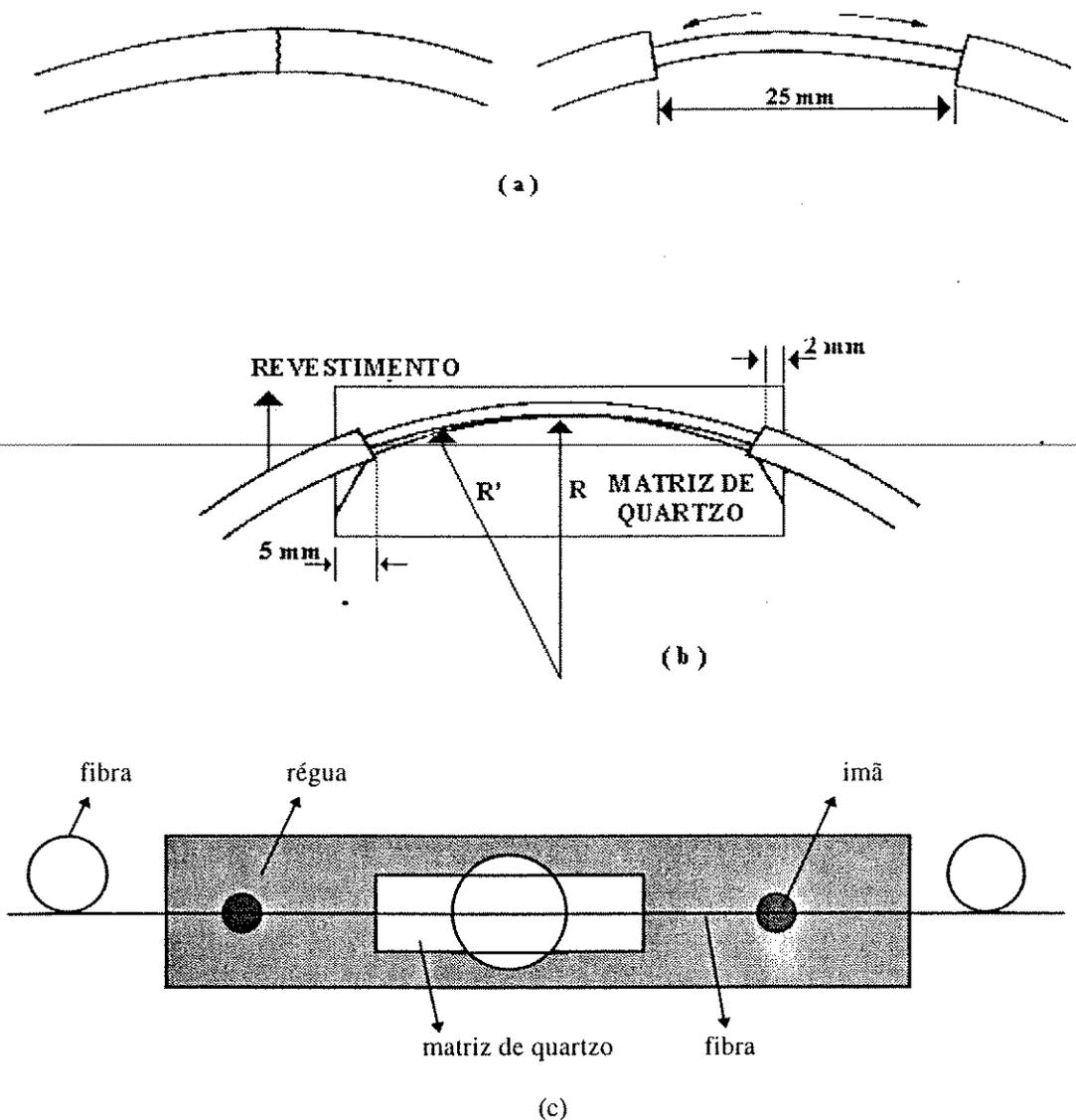


Figura 2.7 - (a) Remoção da resina na parte central da fibra. (b) Posicionamento da fibra na matriz. (c) Fixação da matriz e fibra no suporte.

Nesta etapa, a fibra é tensionada e mantida fixa através de imãs, durante a cura da resina. Observe-se que, na fixação da fibra à matriz, deve-se conservar cerca de 2 mm de fibra revestida no interior do sulco, a fim de preservar sua estabilidade mecânica. Uma vez curada a resina, a UBA é fixada no dispositivo de desbaste e polimento (JIG) (Fig. 2.8) sendo seu processamento realizado na politriz PM2A da Logitech (Fig. 2.9).



Figura 2.8 - Vista do JIG com a UBA.

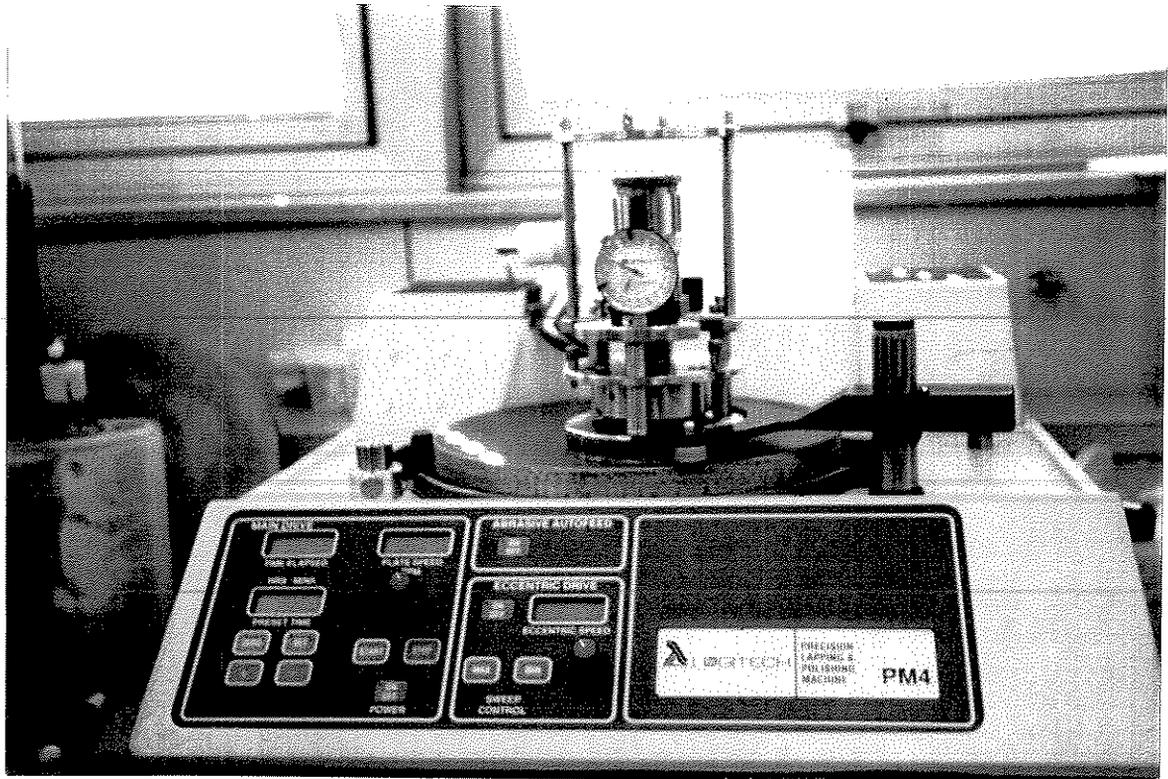


Figura 2.9 - Vista da poltriz com o JIG.

O processamento da UBA é cumprido em duas etapas distintas. A primeira consiste na remoção, por desbaste, de parte da casca da fibra, usando como abrasivo o Óxido de Alumínio ($3\ \mu\text{m}$) e como superfície de desbaste, um prato de ferro fundido com ranhuras radiais. O controle inicial da penetração na casca da fibra é feito mediante o dimensionamento da figura, aproximadamente elíptica, que se forma quando da intersecção do plano de desbaste com a fibra (Fig. 2.10).

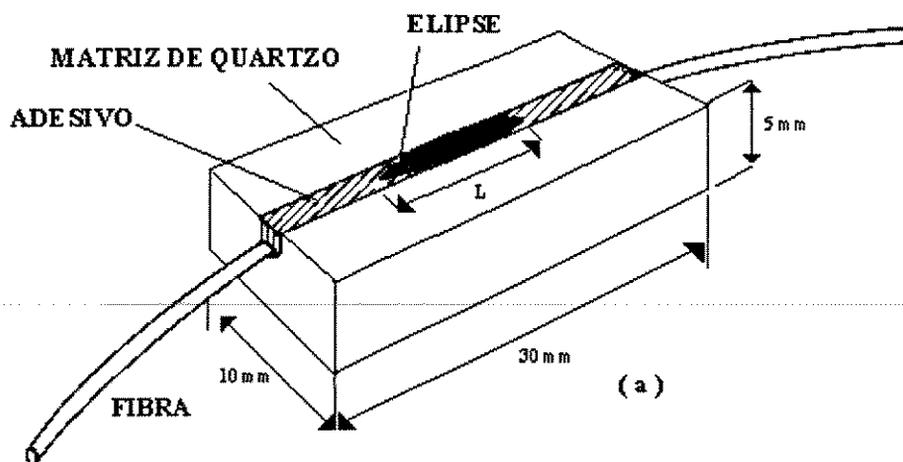


Figura 2.10 - Elipse de desbaste.

Para tanto infere-se a profundidade inicial de penetração p na casca pela relação

$$p = L^2 / 8R \quad \text{onde} \quad (2.8)$$

L = comprimento do eixo maior da elipse

R = raio de curvatura do sulco.

Entretanto, conforme pode ser observado na Fig. 2.7 (b), existe uma diferença entre o raio de curvatura R do sulco e o raio de curvatura real R' , decorrente da presença de fibra revestida no interior do sulco. Além disso, a maioria das fibras apresentam excentricidades do núcleo em relação à casca, o que dificulta a definição de um valor absoluto para a quantidade de casca removida. Por essa razão, a fórmula (2.8) só é utilizada, no início do desbaste, quando a região de fibra seccionada ainda tem

raio de curvatura R igual ao do sulco. A partir daí, conhecida a dimensão da casca e medida a profundidade de penetração inicial p , calcula-se quanto ainda deve ser desbastado e passa-se a controlar p pelo relógio comparador do JIG, com uma precisão de $\pm 2 \mu\text{m}$. Quando houver cerca de $10 \mu\text{m}$ de casca remanescente sobre o núcleo, o desbaste é interrompido e procede-se ao primeiro teste da gota ^[73]. Este teste consiste em se lançar um sinal óptico na fibra da UBA e medir a potência transmitida através dela, primeiramente sem óleo sobre a matriz (P_o) (Fig. 2.11 (a)) e depois com óleo sobre a matriz (P_o') (Fig. 2.11 (b)). Isto é feito colocando-se, sobre a superfície desbastada, uma gota de óleo com índice de refração n_4 ligeiramente superior ao índice de refração n_1 do núcleo da fibra. Este óleo quebra as condições de guiamento da fibra e faz com que a luz acople no líquido, gerando uma extinção de transmissão dada por:

$$E_t = 10 \log P_o'/P_o \quad (2.9)$$

desde que o plano de desbaste tenha atingido o campo evanescente. Esta perda será tanto maior quanto menor for a casca remanescente (t) sobre o núcleo.

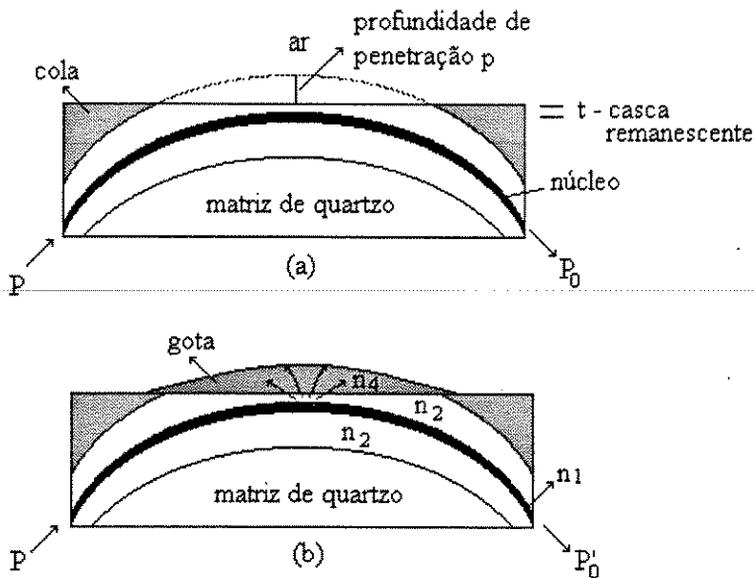


Figura 2.11 - Teste da gota: (a) matriz sem óleo P_0 , (b) matriz com óleo P'_0 .

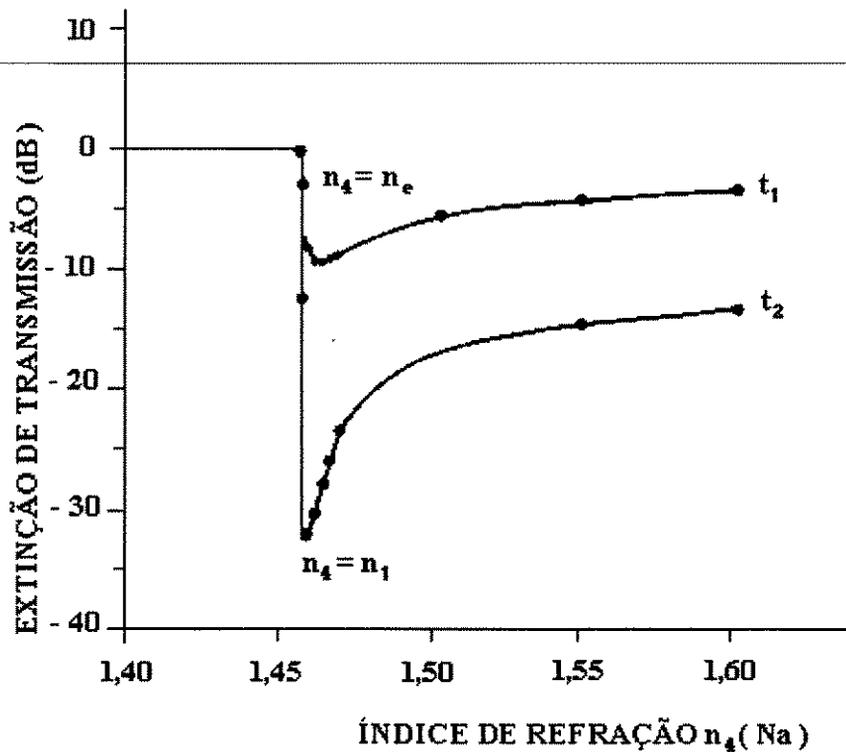


Figura 2.12 - Exemplo de curva de extinção de transmissão x n_4 para espessuras de casca t_1 e t_2 .

A Figura 2.12 mostra exemplos de curvas da extinção de transmissão E_t através de uma UBA, à medida que diferentes óleos de índice n_4 são colocados na região de interação. As duas curvas correspondem a duas espessuras, t_1 e t_2 , de casca remanescente sobre o núcleo. Como era de esperar, antes do corte ($n_4 < n_2$), o modo permanece guiado e não experimenta qualquer atenuação. Após o corte ($n_4 \approx n_e \approx \frac{1}{2} \Delta n$), a transmissão diminui rapidamente, passando por um mínimo em $n_4 = n_1$. A partir daí, o coeficiente de reflexão na interface núcleo-casca começa a aumentar, fazendo com que os raios sejam refletidos de volta para o núcleo, aumentando outra vez o guiamento na fibra. Esta curva pode também ser obtida variando-se a temperatura do óleo utilizado sobre o bloco e, conseqüentemente, o seu índice de refração, enquanto a perda por transmissão é monitorada. De posse dessa curva, seleciona-se o líquido que gera a maior extinção para, com este, traçar curva de extinção E_t em função da casca remanescente t (Figura 2.13).

Tanto a curva da Figura 2.12, como a da Figura 2.13, são curvas auxiliares que devem ser feitas uma única vez, para cada rolo de fibra.

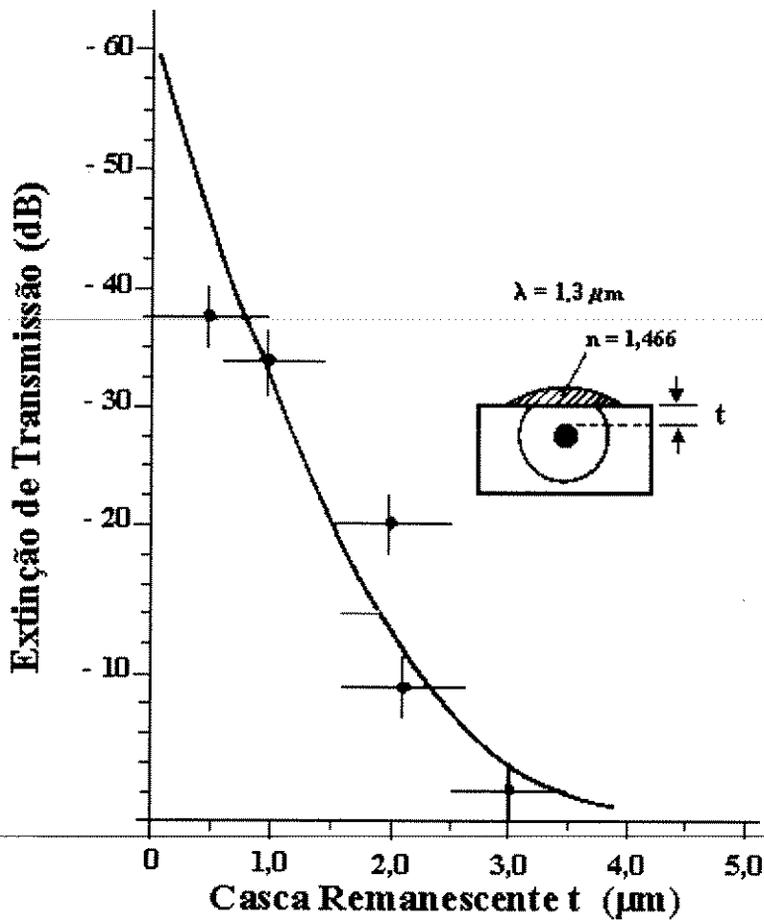


Figura 2.13 - Exemplo de curva de extinção de transmissão em função da casca remanescente t.

A etapa final do processamento da UBA envolve o polimento da superfície desbastada com Óxido de Cério, sobre um disco de poliuretano. Esta etapa é precedida de uma limpeza criteriosa, tanto da politriz como também do JIG. Este último deverá ser, minuciosamente, limpo com água deionizada e cotonete para eliminar quaisquer partículas de abrasivo que possam riscar a superfície. Se isto

ocorrer, o processo tem que ser reiniciado desde a etapa de desbaste o que, na maioria das vezes, causa a perda da UBA.

Para determinar o momento de cessar o polimento, este é interrompido periodicamente para o teste da gota. Quando se deseja uma interação forte com o campo evanescente, o processo de polimento deve ser interrompido ao se atingir perdas da ordem de 60 dB ^[73].

O processo de fabricação das UBA's era, inicialmente, extremamente artesanal^[66], uma vez que, tanto o desbaste quanto o polimento, eram feitos manualmente. A mecanização do processo, com o uso de uma politriz, além de reduzir o tempo de execução da UBA melhorou substancialmente sua qualidade óptica. Em consequência, não só a perda por inserção dos acopladores diminuiu como, também, a eficiência do processo aumentou, já que a constante manipulação das UBA's, que aumentava o risco de quebra das fibras, foi abolida.

Capítulo III

3. ACOPLADOR

3.1 Introdução

Quando duas fibras ópticas são colocadas com seus núcleos próximos e apenas uma delas é inicialmente iluminada, observa-se a transferência de energia eletromagnética de uma fibra para a outra, através de seus campos evanescentes. Esta troca de energia nos faculta a confecção do acoplador óptico direcional, representado esquematicamente na Figura 3.1.

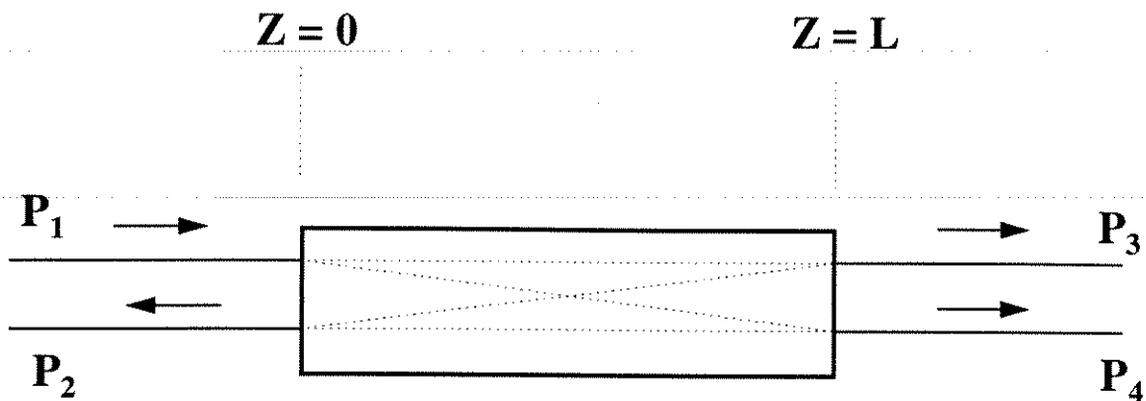


Figura 3.1 - Esquema de acoplador convencional 2x2.

Utilizando-se duas das UBA's descritas no capítulo anterior, construiu-se um acoplador óptico monomodo, como o esquematizado na Figura 3.1. Para tanto duas UBA's foram superpostas adequadamente (Fig. 3.2) a fim de manter os núcleos das fibras suficientemente próximos e possibilitar a interação de seus campos evanescentes.

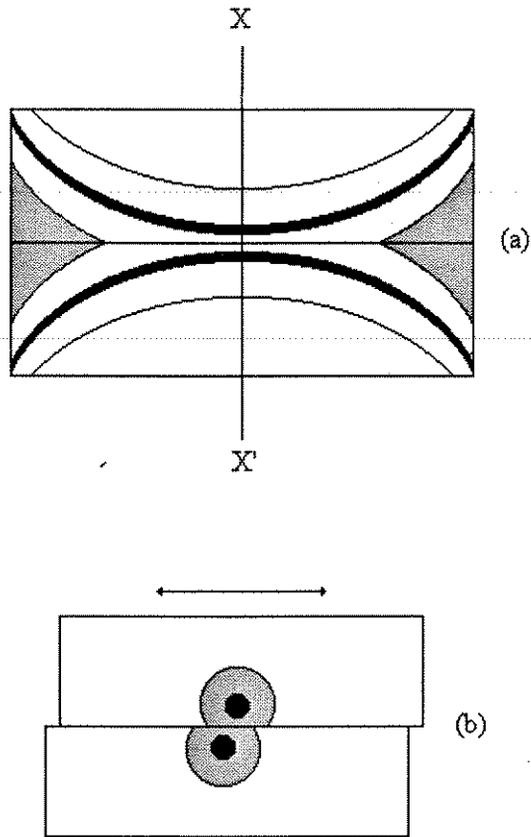


Figura 3.2 - (a) Acoplador óptico formado pela superposição de duas UBA's; (b) corte XX'.

Entre as UBA's foi inserido, por capilaridade, um líquido com índice de refração aproximadamente igual ao da casca, cuja finalidade é, além de eliminar a camada de ar que permanece entre os blocos, facilitar o deslizamento de uma UBA sobre a outra. O deslocamento relativo das UBA's é conseguido posicionando-se o acoplador no interior de um sistema de alinhamento (Figura 3.3), munido de três micrômetros que têm por objetivo o deslocamento relativo transversal e longitudinal

das fibras. Essa liberdade de movimento de uma UBA sobre a outra possibilita a confecção de acopladores com razões de acoplamento variáveis e perdas insignificantes, o que torna este tipo de dispositivo extremamente relevante como dispositivo de laboratório.

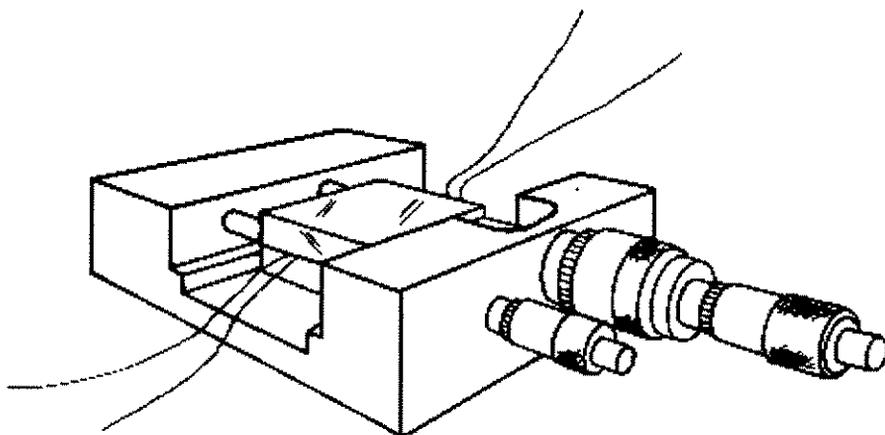


Figura 3.3 - Posicionamento do acoplador no alinhador (o 3^o micrômetro não aparece no desenho).

3.2 Modelo Teórico

Uma das formas de entender a transferência de energia de uma fibra para outra usa uma combinação de teoria de perturbação com teoria de acoplamento de modos [6]. Neste modelo, considera-se que a distribuição de campo de uma fibra não é afetada pela proximidade da outra e que a transferência de potência entre elas resulta da sobreposição dos campos evanescentes de dois modos adjacentes [73].

Assumindo duas fibras idênticas e paralelas, a teoria de acoplamento de modos [74] prediz que, na aproximação de guiamento fraco, a distribuição de potência após uma distância de interação z , num acoplador sem perda, constituído de duas fibras paralelas e idênticas é:

$$P_3 = P_1 \cos^2 (cz) \tag{3.1}$$

$$P_4 = P_1 \sin^2 (cz)$$

onde P_3 e P_4 são as potências de saída da fibra principal (de lançamento) e da fibra acoplada, respectivamente, sendo P_1 a potência incidente na fibra principal em $z = 0$ (Figura 3.1). O parâmetro c corresponde ao coeficiente de acoplamento entre as fibras, por unidade de comprimento.

Pelas equações acima, vê-se que a energia guiada é periodicamente transferida de uma fibra para outra. Este processo é ilustrado de forma simples por DIGONNET e KIM ^[74] que mostram que, quando os modos de duas fibras próximas apresentam o mesmo coeficiente de propagação, acontecem interações ressonantes que possibilitam a transferência total de energia de uma fibra para a outra (Figura 3.4). A distância requerida para que haja transferência total de potência de uma fibra à outra é chamada de comprimento de acoplamento $L_c = \pi / 2c$ (distância AB na Figura 3.4). Se a interação continua além deste ponto, o sinal é acoplado de volta na fibra inicial (distância AC na Figura 3.4). Se a região de acoplamento for suficientemente longa, o processo se repete de forma cíclica ao longo do acoplador.

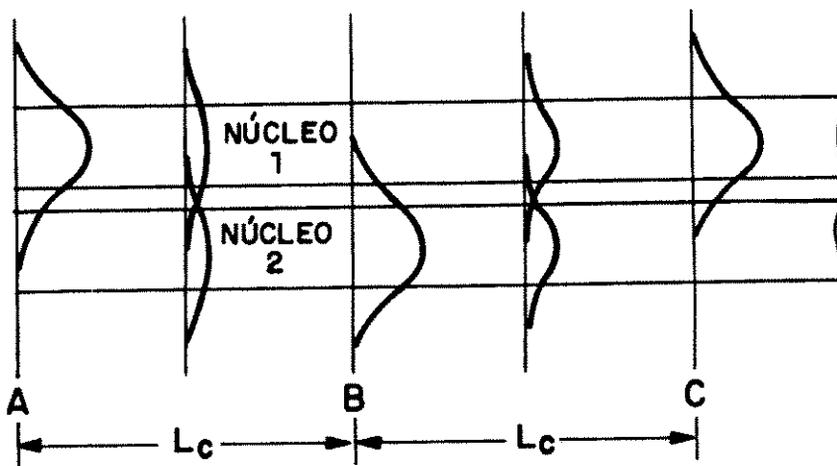


Figura 3.4 - Conceito de acoplamento de modos ^[74]

Partindo das deduções de VANCLOOSTER e PHARISEUX ^[75] e, usando a aproximação de guiamento fraco, o coeficiente de acoplamento entre as fibras fica ^[6]

$$c = [\lambda / (2\pi n_1)] (u^2 / a^2 V^2) [K_0(wh_0/a)] / K_1^2(w) \quad (3.2)$$

onde λ é o comprimento de onda do sinal, h_0 a distância mínima entre os eixos da fibra e K_v são as funções de Hankel modificadas de ordem v . Quanto mais próximos os núcleos, maior a interação dos campos evanescentes e maior o coeficiente de acoplamento. Os parâmetros u e w são os parâmetros transversos do núcleo e casca, respectivamente .

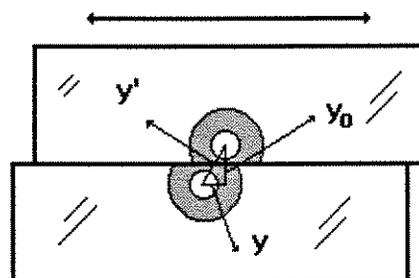


Figura 3.5 - Deslocamento relativo entre as fibras.

No caso prático do acoplador por polimento, além de as fibras serem submetidas a um raio de curvatura R , elas têm liberdade de movimento lateral relativo (Figura 3.5). Conseqüentemente, não só o espaçamento entre as fibras h como também o coeficiente de acoplamento $c(h)$ depende do deslocamento relativo entre as fibras y' , da posição z ao longo da região de interação e do raio de curvatura R da fibra (Figura 3.6).

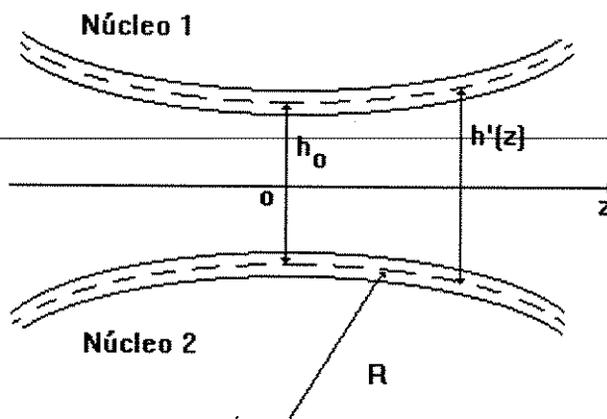


Figura 3.6 - Vista da distância entre os núcleos da fibra em função de z .

FINDAKLY ^[76] mostrou, por integração direta da potência ao longo da região de interação, que a potência óptica entre as fibras é trocada seguindo as equações:

$$P_3 = P_1 \cos^2 (c_0 L) \tag{3.4}$$

$$P_4 = P_1 \sin^2 (c_0 L)$$

onde

$$c_0 L = \int c (z) dz \tag{3.5}$$

$c_0 = c(0)$ é o valor do coeficiente de acoplamento em $z = 0$ onde o espaçamento mínimo entre as fibras é h_0 e L é o chamado comprimento de interação efetivo do acoplador.

Pode-se mostrar, facilmente, que o espaçamento $h (z)$ entre os eixos das fibras é uma função do raio de curvatura R da fibra e do deslocamento lateral relativo y entre as fibras, ou seja

$$h(z) = [(h_0 + z^2 / R)^2 + y^2]^{1/2} \tag{3.6}$$

onde y é o deslocamento lateral entre as fibras (Figura 3.7).

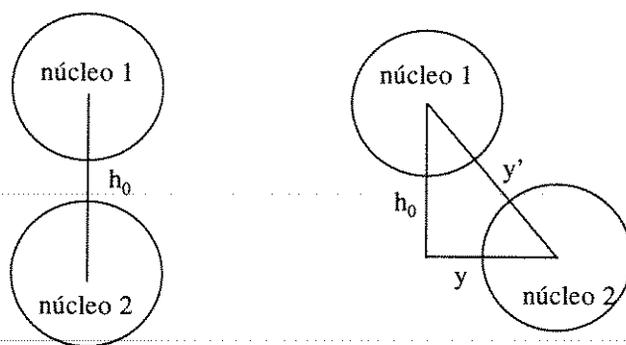


Figura 3.7 - Posição relativa entre os núcleos das fibras: (a) fibra superposta $y = 0$;
 (b) fibra deslocada, $y \neq 0$.

Da mesma forma, pode-se notar que o comprimento de interação efetivo L pode ser escrito como ^[6]

$$L = (\pi R a / w)^{1/2} \quad (3.7)$$

ou seja, com dependência direta do raio de curvatura R da fibra.

Entre os parâmetros relevantes na caracterização dos acopladores ópticos destacamos a eficiência de acoplamento η , a perda por inserção P e a diretividade D . Para a configuração de acoplador apresentada na Figura 3.1, a eficiência de acoplamento ou razão de acoplamento entre as fibras, η , em decibéis, é definida como:

(3.8)

$$\eta = - 10 \log (P_4 / (P_3+P_4))$$

A perda por inserção P em decibéis é dada por:

(3.9)

$$P = - 10 \log [(P_3+P_4) / P_1]$$

e a diretividade D em decibéis é dada por:

(3.10)

$$D = - 10 \log (P_2 / P_1)$$

A eficiência de acoplamento óptico é entendida como a fração de potência óptica que é transferida de uma fibra para a outra. No caso do acoplador por polimento, este fator é fixado no valor mais conveniente para cada aplicação uma vez que, a princípio, a razão de acoplamento é variável.

A perda por inserção P caracteriza o quanto de potência óptica é perdida durante o percurso da luz dentro do acoplador, enquanto a diretividade D indica a fração de luz que retorna do dispositivo para a segunda fibra de entrada (P_2).

3.3 Resultados Experimentais

3.3.1 Montagem do Acoplador

Para montagem do acoplador, duas UBA's semelhantes são selecionadas. Como tal entendemos as UBA's confeccionadas com o mesmo tipo de fibra e apresentando mesma extinção de transmissão. Uma vez selecionadas as UBA's, estas são submetidas a um rigoroso processo de limpeza dentro da área limpa, com acetona, cotonete e lenço de papel livre de resíduos, para garantir a ausência de quaisquer micro-partículas que possam agir como separador das UBA's. Feito isto, as UBA's são superpostas e entre elas um líquido com índice de refração aproximadamente igual ao da casca é introduzido por efeito de capilaridade (Figura 3.8). Este procedimento, além de eliminar a camada de ar existente entre as fibras, facilita o deslocamento relativo das UBA's. Terminada esta etapa, o acoplador já está montado, embora desalinhado. Seu posicionamento no interior do sistema de alinhamento (Figura 3.3) facilita o deslocamento relativo das UBA's e, conseqüentemente, a superposição das fibras.

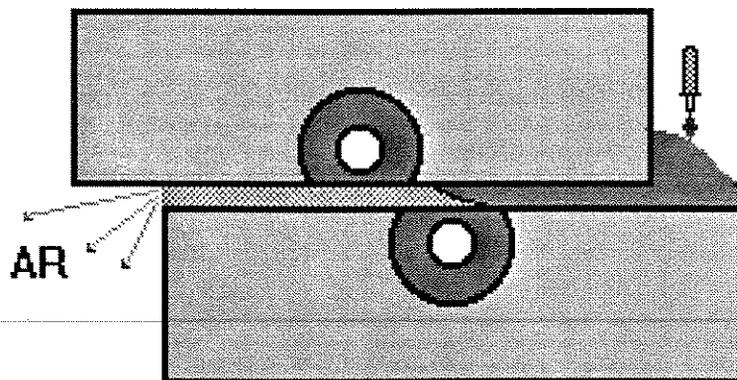


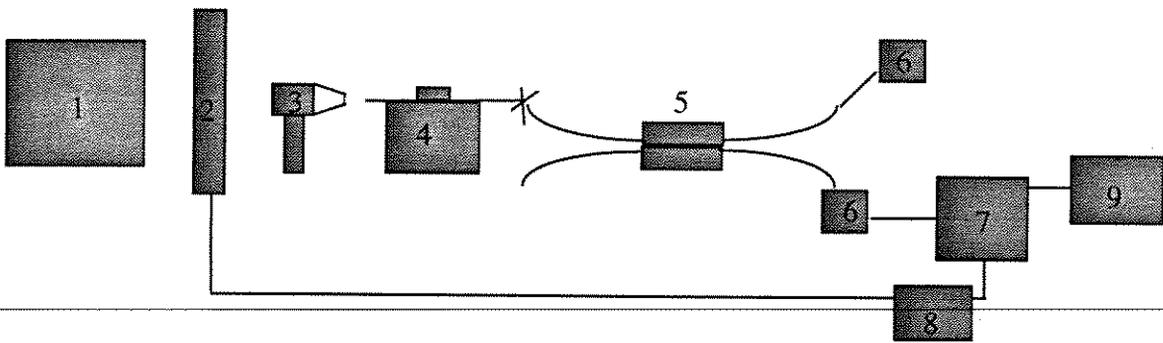
Figura 3.8 - Superposição das UBA's

3.3.2 Caracterização Óptica do Acoplador

Para caracterizar o acoplador obtido, quatro parâmetros foram considerados relevantes: a eficiência de acoplamento (Eq. 3.8), a perda por inserção (Eq. 3.9), a diretividade (Eq. 3.10) e a estabilidade térmica do dispositivo.

A montagem óptica utilizada é esquematizada na Figura 3.9. Nela a luz de um monocromador (Jarrell Ash), após passar por um "chopper", é focalizada em uma objetiva 10X, incidindo numa fibra multimodo de lançamento. A monitoração do sinal de saída é feita por um detector de Ge associado a um amplificador "lock-in"

(Princeton Applied Research). Todo o sistema é controlado por um computador (HP98250) e um multiprogramador (HP 6540B).



1-monocromador
2- "chopper"
3-objetiva 10x
4-microposicionador
5-acoplador

6-detector de Si
7-lock - in
8-contr.velocidade "chopper"
9-voltímetro

Figura 3.9 - Montagem de caracterização óptica.

Inicialmente, a posição da fibra de lançamento é otimizada para a situação de máxima potência óptica de saída. Somente então o acoplador é inserido na montagem através da soldagem da fibra de lançamento à fibra principal do acoplador. Feito isto o acoplador é cuidadosamente alinhado para que a eficiência de acoplamento desejada, em determinado comprimento de onda, seja alcançada. Esta vai depender não só de parâmetros geométricos já definidos quando da confecção das UBA's, como também do deslocamento relativo lateral (dependência forte) e longitudinal (dependência fraca) das elipses de polimento (Figura 3.10).

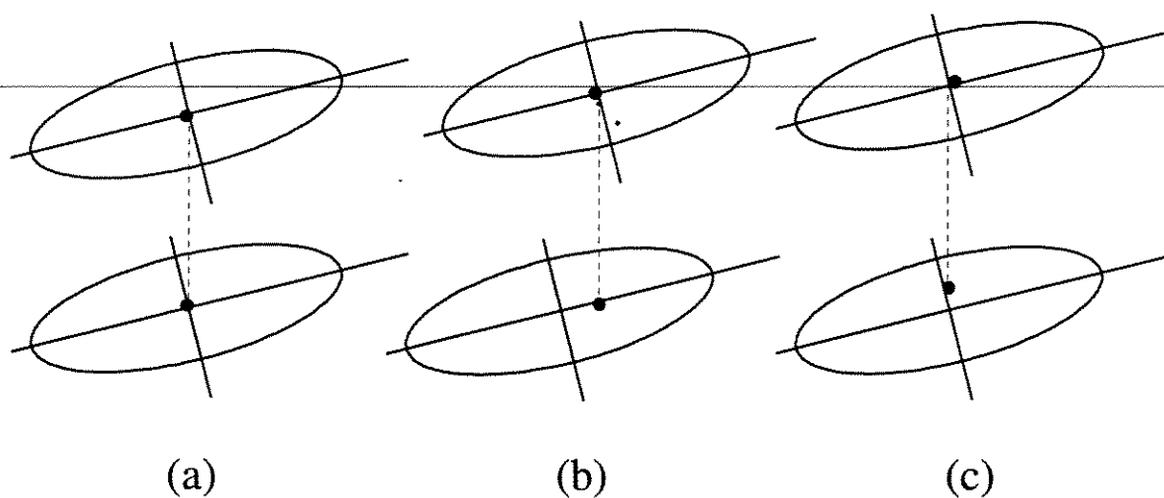


Figura 3.10 - (a) Elipses superpostas; (b) elipses deslocadas longitudinalmente; (c) elipses deslocadas lateralmente.

A partir de então, fazem-se varreduras espectrais das potências ópticas de saída e entrada do acoplador na região espectral de interesse, sendo os dados processados, adequadamente, para cada aplicação do dispositivo, de acordo com o diagrama esquemático da Figura 3.11.

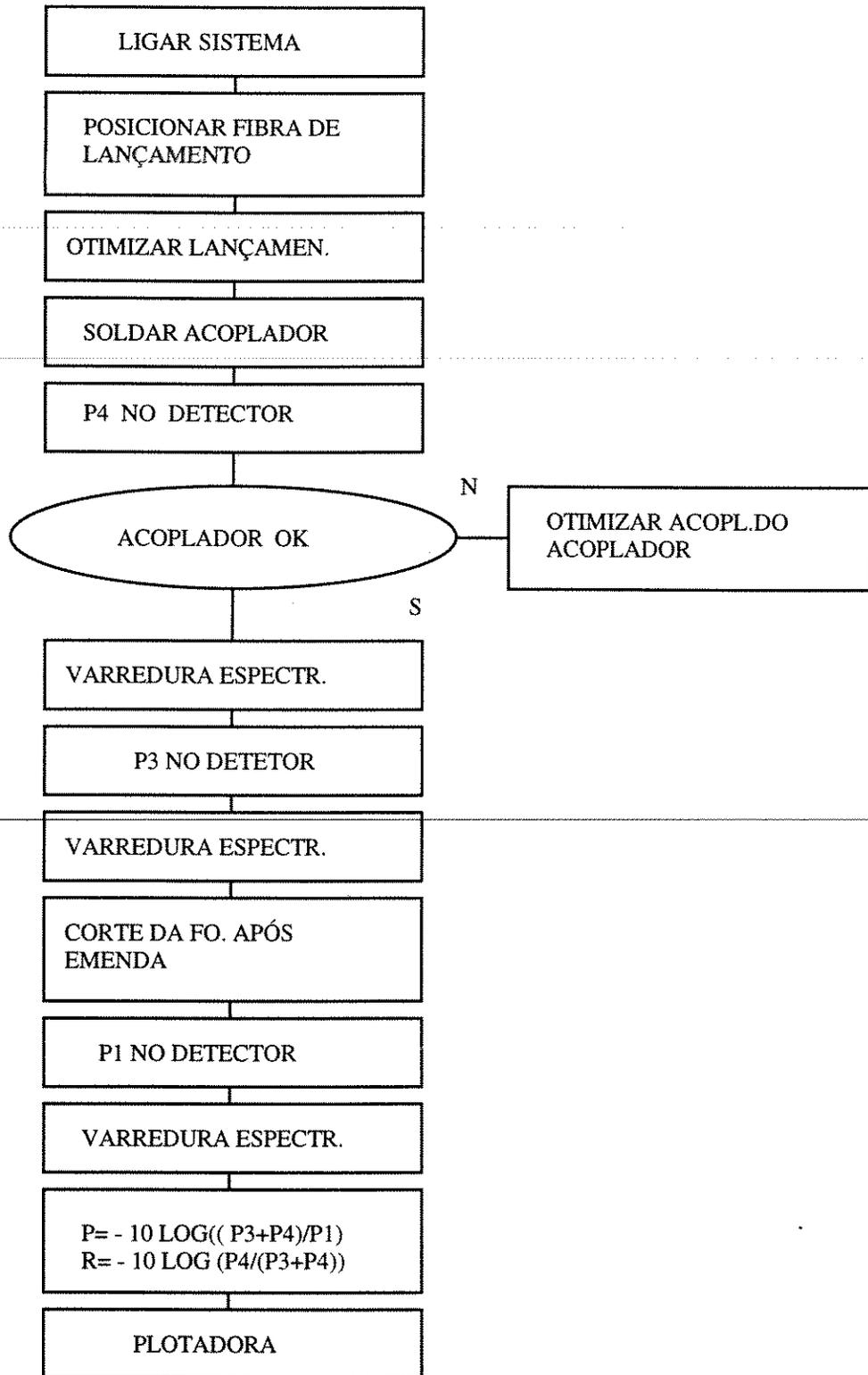


Figura 3.11 - Diagrama esquemático de caracterização óptica .

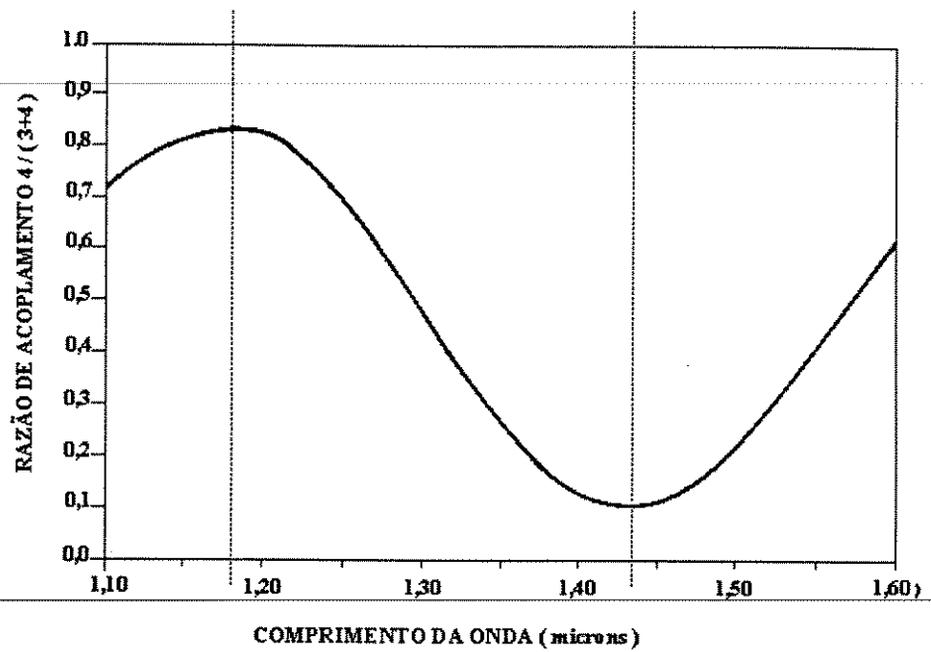
O processo de caracterização óptica ficará devidamente ilustrado com a descrição sucinta de algumas das aplicações dadas aos acopladores em questão, entre as quais destacamos os multiplexadores e os atenuadores ópticos “in line” [68, 69].

3.3.3 Multiplexador Óptico

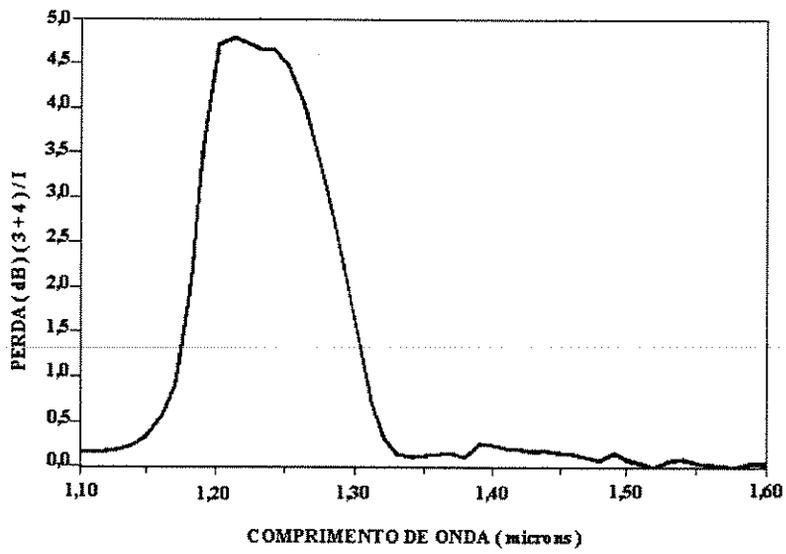
O emprego do multiplexador óptico tem, entre outros objetivos, a utilização mais eficiente da ampla largura de banda disponível das fibras monomodo e o bombeio de sinais nos amplificadores ópticos de fibras ópticas dopadas com terras raras.

No primeiro caso, dois ou mais comprimentos de onda são simultaneamente inseridos, processados e extraídos de uma mesma fibra. No segundo caso, o sinal óptico a ser amplificado e o sinal de bombeio, de comprimentos de ondas diferentes, são simultaneamente injetados no amplificador, facultando o uso eficiente da energia de bombeio. As características dos multiplexadores, especialmente sua resposta espectral, variam bastante para cada aplicação. A Figura 3.12 ilustra um ensaio de multiplexador para ser utilizado, em telecomunicações, nas janelas de 1,3 e 1,55 μm [68]. A idéia geral é que, sendo a potência acoplada no acoplador monomodo, fortemente dependente do comprimento de onda, seja possível lançar dois sinais diferentes em duas entradas independentes do acoplador, de forma que

estes saiam num mesmo braço (Figura 3.13), ou seja, um sinal acopla totalmente e o outro passa direto.



(a)



(b)

Figura 3.12 - (a) Caráter seletivo do multiplexador (b) Perda do WDM

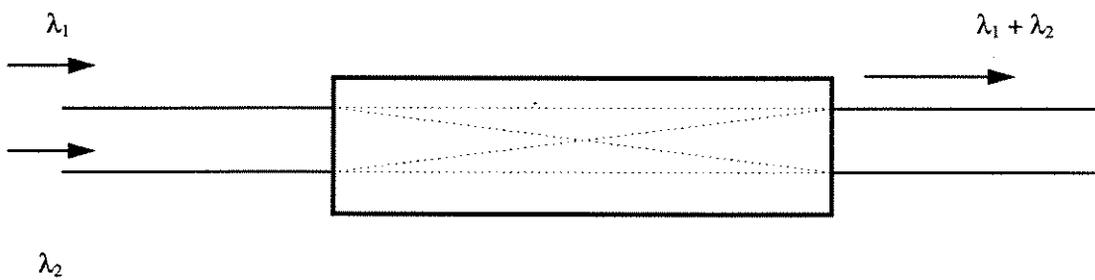


Figura 3.13 - Multiplexador para dois comprimentos de onda.

O dispositivo cujo resultado é apresentado na Fig. 3.12 foi confeccionado da forma anteriormente descrita. A separação entre canais do exemplo apresentado é de $\Delta\lambda = 250$ nm, como se esperava para um dispositivo a ser utilizado nas principais janelas de telecomunicações (1,3 e 1,55 μm). Entretanto as posições de máximo e mínimo acoplamento não estão centradas nos comprimentos de onda de interesse ou seja, 1,3 e 1,55 μm mas em 1,18 e 1,43 μm . Este deslocamento é resolvido aproveitando-se o poder de sintonização do dispositivo e variando-se a distância entre os núcleos pelo deslocamento relativo das fibras. Este procedimento altera o acoplamento em ambos os comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , sem alterar $\Delta\lambda$.

A eficiência do dispositivo será máxima quando um sinal λ_1 estiver totalmente acoplado enquanto o outro, λ_2 , permanecer totalmente desacoplado. A baixa isolamento entre canais (7,2 dB), observada na figura 3.12 (a), tem origem no elevado índice de refração utilizado entre as UBA's que, quebrando as condições de guiamento, faz com que o guia sofra perdas por radiação. A melhor separação de canal com $\Delta\lambda = 35$ nm foi medida para um dispositivo com raio de curvatura de 8 metros^[6].

Os resultados apresentados na Figura 3.12 podem ser melhorados com o controle mais preciso da quantidade de casca remanescente na estrutura de acoplamento, pela escolha adequada do raio de curvatura R da fibra e, conseqüentemente, do

comprimento de interação L , pela otimização da distância entre os núcleos e pela escolha adequada do índice de refração a ser inserido entre os blocos.

3.3.4 Atenuador Óptico

O atenuador óptico ^[69], a exemplo dos acopladores convencionais e dos multiplexadores, é formado pela superposição de duas UBA's. A diferença dele para o acoplador convencional é que enquanto este varia a razão de acoplamento através do deslocamento relativo e paralelo das fibras, o atenuador é provido de um mecanismo tal que facilita a rotação de uma UBA sobre a outra (Figura 3.14), gerando atenuação no sinal da fibra de saída, por perda de potência, através do líquido que permanece entre as UBA's.

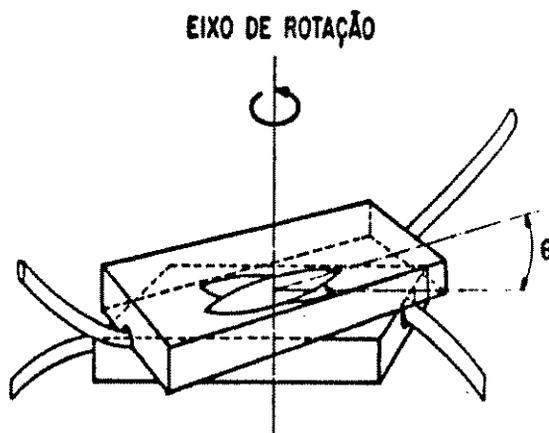


Figura 3.14 - Rotação relativa das UBA's do atenuador.

Neste caso, a atenuação do dispositivo é relativa ao ângulo de rotação dado e obteve-se atenuação superior a 30 dB (Figura 3.15).

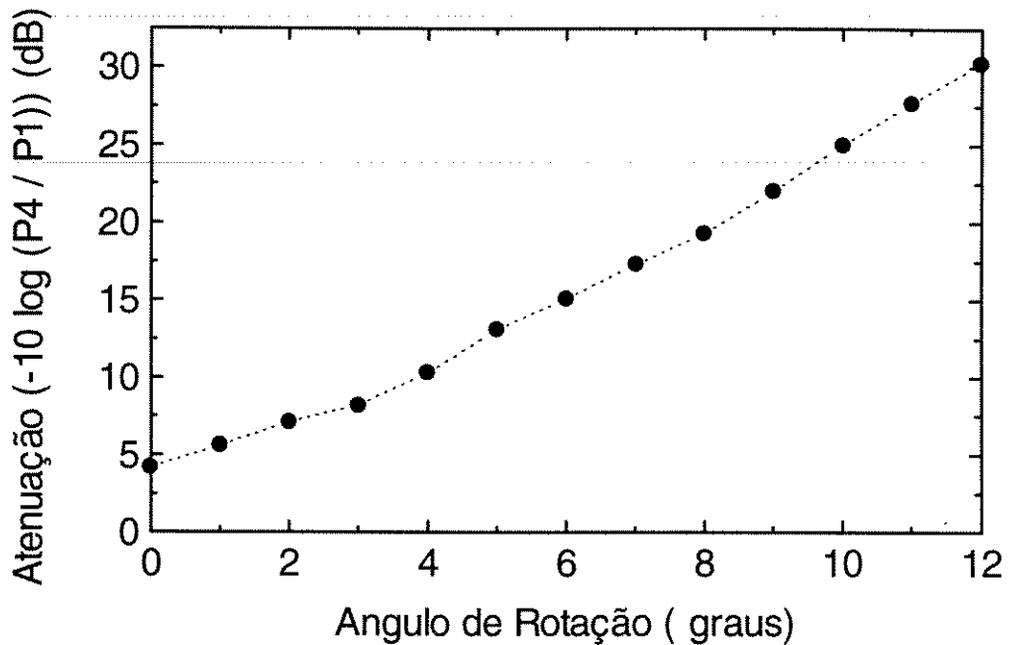


Figura 3.15 - Atenuação x Ângulo de rotação da UBA

Outro parâmetro relevante, medido neste atenuador, foi sua diretividade D. No dispositivo em questão, um atenuador fabricado com fibra multimodo, a diretividade, medida no ângulo de máximo acoplamento, foi superior a 57 dB.

A estabilidade térmica do acoplador por polimento foi medida após torná-lo um dispositivo fixo. Para tanto, o líquido geralmente presente entre as UBA's foi substituído por uma resina de cura térmica (Epotek 301-2), com tempo de

endurecimento de 24 horas. O processo de alinhamento convencional foi executado enquanto a resina não estava rígida. Decorrido o tempo de cura o acoplador, já agora fixo, foi submetido a uma variação de temperatura de cerca de 60 °C, em decorrência da qual registrou-se uma variação na razão de acoplamento menor que 0,5 % / °C. Observou-se que esta mudança na razão de acoplamento é reversível com a temperatura ^[66].

Capítulo IV

4. ACOPLADORES QUE PRESERVAM A POLARIZAÇÃO DA LUZ

4.1 Introdução

Os acopladores fabricados com fibras especiais, capazes de preservar o estado de polarização linear da luz, são componentes de considerável importância para os sistemas onde ruído de polarização, estabilidade e sensibilidade são fatores limitantes. Dentre os sistemas citados podemos destacar os giroscópios ópticos ^[77], os sensores interferométricos ^[78] e os sistemas de comunicação coerentes ^[79].

Para que os referidos sistemas se beneficiem das características de preservação de polarização destas fibras, é preciso que os dispositivos a serem utilizados também mantenham a polarização do sinal, num grau comparável ao da fibra. Para que isto ocorra, os eixos de birrefringência das fibras que compõem o dispositivo, no caso Acoplador que Mantém a Polarização (AMP), devem ter um grau de alinhamento melhor que 0,5 grau ^[80].

Alinhamentos desta ordem constituem as maiores dificuldades na confecção dos acopladores AMP. Os processos de alinhamento desenvolvidos, nem sempre são eficientes ^[81], sendo algumas vezes extremamente laboriosos ^[20, 21]. Em seguida, apresentaremos um método rápido e eficiente ^[66] para orientar os eixos de uma fibra de alta birrefringência de forma a se obterem acopladores que mantêm um grau de polarização da luz semelhante ao das fibras, antes de estas serem processadas.

4.1.1 Fibras que Mantêm a Polarização da Luz

As fibras monomodo são, na verdade, fibras bimodais, uma vez que o modo fundamental da luz pode propagar-se em dois estados de polarização ortogonais ^[82].

Já a fibra de polarização mantida, refere-se à fibra que preserva o estado linear de polarização da luz. A produção desse tipo de guia requer a introdução de birrefringência na fibra, durante sua fabricação. Um dos meios utilizados para isso é a inclusão de elementos de tensão na fibra que, ao tensioná-la, mudam seu índice de refração de forma diferencial, quebram sua simetria circular e definem dois auto-estados de polarização linear denominados modo lento e modo rápido (Figura 4.1).

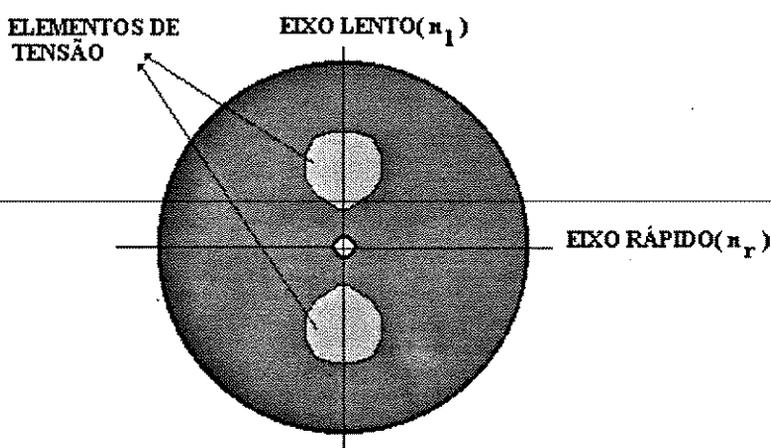


Figura 4.1 - Fibra de alta birrefringência

O índice de refração n_l será maior na direção da tensão aplicada (menor velocidade do modo \rightarrow eixo lento) e menor na direção ortogonal n_r (maior velocidade do modo \rightarrow eixo rápido). Chamaremos de β_l e β_r às constantes de propagação dos respectivos modos lento e rápido.

O efeito da birrefringência na polarização da luz guiada pode ser melhor entendido observando-se a Figura 4.2 ^[83], onde uma luz linearmente polarizada, a 45° dos modos lento e rápido, é injetada na fibra excitando os dois modos igualmente. À medida que a luz se propaga, o modo lento muda de fase em relação ao modo rápido, dando lugar a uma sequência periódica de estados de polarização.

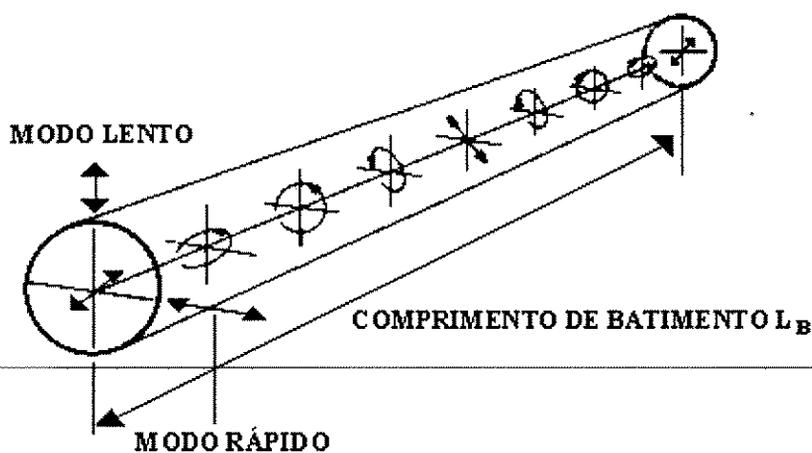


Figura 4.2 - Evolução da polarização ao longo de fibra birrefringente.

Após um certo comprimento L , os dois modos ortogonais estarão com uma diferença de fase dada por:

$$\delta = (\beta_r - \beta_l) L \tag{4.1}$$

que fará com que a luz, na saída da fibra, esteja elipticamente polarizada. Quando esta diferença for igual a 2π rad, o estado inicial de polarização se reproduzirá, o que acontecerá para :

(4.2)

$$L = L_B = 2\pi / B$$

onde L_B é, o comprimento de batimento e B a birrefringência da fibra, dada por:

$$B = \beta_l - \beta_r \quad (4.3)$$

A razão entre o campo elétrico mínimo e máximo da elipse de polarização é dada por ^[84,85].

$$\eta = (E_{\min}/E_{\max}) = (\sin 2\theta \sin \delta) / (1 + (1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \delta)^{1/2}) \quad (4.4)$$

onde θ é o ângulo entre a direção de lançamento da luz linearmente polarizada e um dos eixos principais.

O grau de polarização da fibra é dado por :

(4.5)

$$P = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$$

onde I_{\max} e I_{\min} correspondem às intensidades dos eixos maior e menor da elipse de polarização, na saída da fibra.

Expressando o grau de polarização em função de η temos que :

(4.6)

$$P = (1 - \eta^2) / (1 + \eta^2) = (1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \delta)^{1/2}$$

Pela Eq. (4.6), vemos que, para $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$, o valor de $P = 1$, situação esta em que a luz está linearmente polarizada ^[86].

A extinção de polarização $E_p(\theta)$ da fibra será dada pela relação :

(4.7)

$$E_p = -10 \log(I_{\min} / I_{\max})$$

As considerações feitas para as fibras que mantêm a polarização linear da luz são também válidas para os dispositivos confeccionados com estas fibras, sendo que para os acopladores AMP, em especial, sua habilidade em preservar o estado de polarização linear da luz, vai depender de três fatores :

- a) do grau de alinhamento angular entre as fibras
- b) da birrefringência B da fibra utilizada
- c) da geometria do dispositivo.

Em geral, a isolação de polarização do acoplador será o resultado da combinação destes três fatores ^[82].

4.1.2 Acoplador que Mantém a Polarização da Luz (AMP)

Neste trabalho, foram utilizadas fibras ópticas do tipo PANDA providas de elementos aplicadores de tensão, com coeficiente de expansão térmica diferente do da casca. A geometria escolhida para o acoplador foi a de acoplamento através do eixo lento.

4.1.2.1 Orientação da Fibra ao Microscópio

A simples observação de uma fibra do tipo PANDA em um microscópio óptico, por transmissão, fornece as informações necessárias à orientação de seus eixos para confecção de um acoplador AMP. Para podermos manipular estas informações, foi desenvolvido um dispositivo mecânico (Figura 4.3) capaz de girar a fibra, enquanto ela permanece tensionada para orientar os seus eixos, adequadamente.

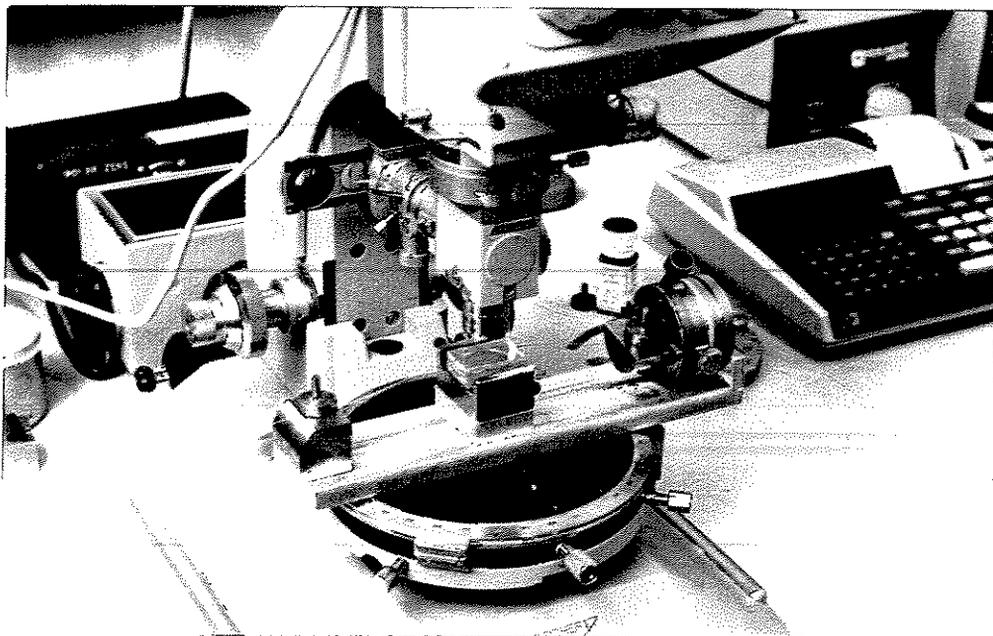


Figura 4.3 - Dispositivo mecânico de orientação da fibra.

Este dispositivo, que é usado sob o microscópio óptico por transmissão, é constituído de uma régua de ferro que tem em uma de suas extremidades um goniômetro, com precisão de 0,1 graus e, no centro, um suporte de amostra, que é intencionalmente vazado para permitir passagem de luz durante as observações. A orientação dos eixos é iniciada pela remoção de resina da parte central da fibra que é fixada ao estágio, com um ímã. Através de um furo passante, um peso é introduzido na outra extremidade da fibra para que esta, embora livre para girar, permaneça tensionada. A seguir, gira-se o goniômetro, até superpor os dois elementos de tensão e obter-se, dos dois, uma única imagem. A seguir, coloca-se a resina de fixação a ser utilizada, faz-se um ajuste fino da posição dos elementos,

fixa-se o goniômetro e, finalmente, prende-se a outra extremidade da fibra com o imã, retirando-se o peso. A resina utilizada deverá ter um índice de refração semelhante ao da casca da fibra para, anulando o efeito de lente da fibra, aumentar a visibilidade dos elementos de tensão.

Se o acoplamento pretendido deve ser feito através dos eixos lentos (Figura 4.4), os elementos de tensão devem ser superpostos de forma a gerar uma única imagem dos elementos.

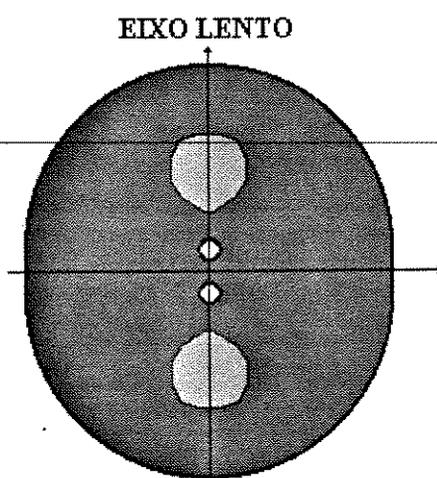


Figura 4.4 - Acoplamento através do eixo lento.

Se o acoplamento deve ser feito através do eixo rápido (Figura 4.5), a imagem observada é a de dois elementos em paralelo. No nosso caso o acoplamento foi feito através do eixo lento.

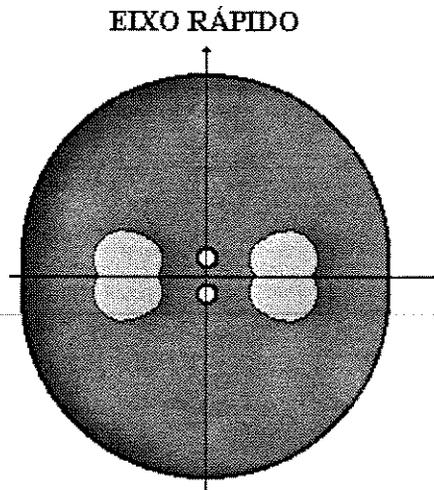


Figura 4.5 - Acoplamento através do eixo rápido.

Feito o posicionamento inicial dos elementos, complementa-se a orientação com o ajuste fino do goniômetro e fixa-se a outra extremidade da fibra com imã na régua. O sistema é deixado em repouso durante 12 horas, para aguardar a cura da resina e, só então, é liberado para fixação no JIG.

O processo de desbaste no JIG é interrompido a uns 10 μm do núcleo, quando um dos elementos de tensão já foi totalmente removido, o que é detectado pela presença de luz em apenas um dos elementos de tensão e no núcleo (Figura 4.6).

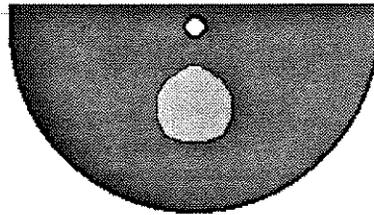


Figura 4.6 - Esquema da retirada, por desbaste, de um dos elementos de tensão da fibra.

A confecção da UBA e montagem do acoplador seguem o procedimento estabelecido no Capítulo 2 para confecção das UBA's com fibras convencionais.

4.1.3 Caracterização Óptica do Acoplador

Para caracterizar o acoplador (Figura 4.7), foi utilizada a luz de um diodo laser semiconductor e multimodo em $0,85 \mu\text{m}$, com largura de linha de $\Delta\lambda = 3 \text{ nm}$. A luz, após ser colimada e passar através de um polarizador (Figura 4.8), é lançada na fibra de entrada P_1 do acoplador sob vários ângulos de polarização θ com um dos eixos principais da fibra. Na saída do acoplador a luz, após passar por um analisador, é lançada no detector que, associado a um "lock-in", nos fornece os dados necessários à análise do dispositivo. Para comparar a extinção de polarização do acoplador e da fibra, as mesmas medidas foram feitas para o acoplador e para a fibra isolada.

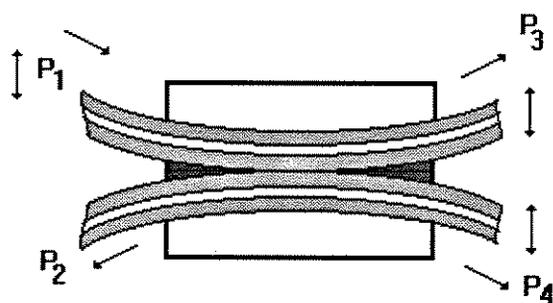


Figura 4.7 - Acoplador AMP.

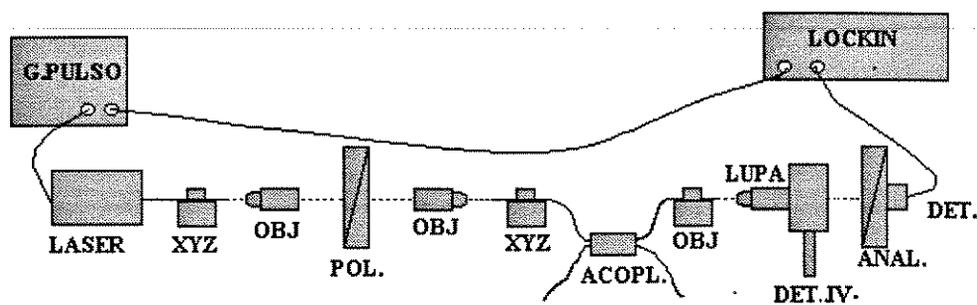


Figura 4.8 - Diagrama esquemático de caracterização óptica do acoplador AMP.

Na Figura 4.9 observa-se a extinção de polarização $E_p = -10 \log(I_{\min} / I_{\max})$ para a fibra acoplada P_4 e para a fibra íntegra, em função do ângulo de incidência. I_{\max} e I_{\min} são as intensidades de saída máxima e mínima, respectivamente.

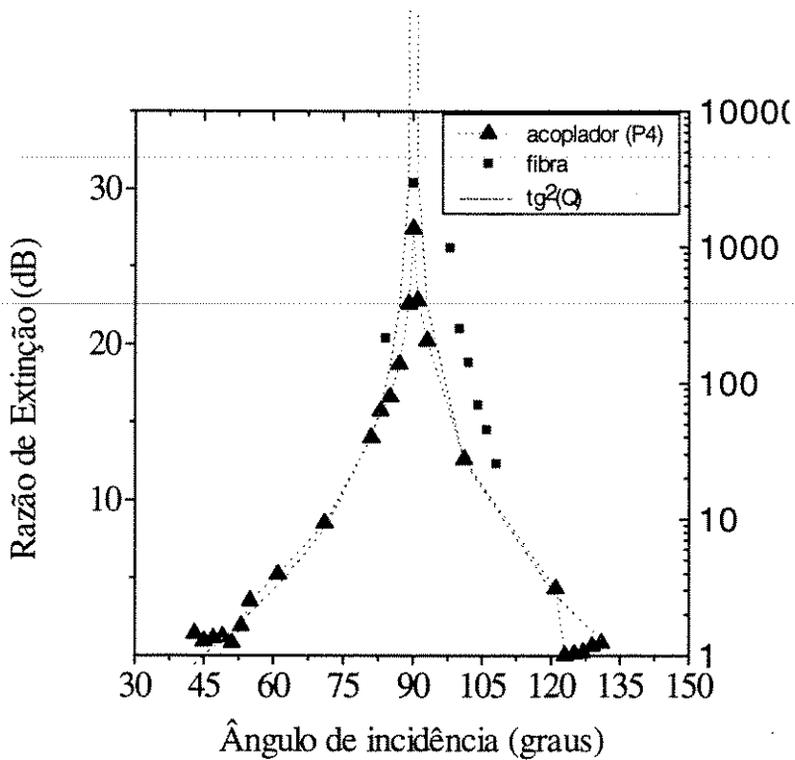


Figura 4.9 -Extinção de polarização x ângulo de polarização para o acoplador e a fibra.

A figura mostra que a extinção de polarização E_p máxima na fibra P_4 do acoplador é análoga àquela obtida para a fibra íntegra, que concorda com a curva teórica $tg^2\theta$.

O fato de a extinção de polarização ser independente da razão de acoplamento foi outro resultado relevante observado durante esta experiência, uma vez que o acoplador AMP, embora possa ser utilizado como um dispositivo fixo (razão de

acoplamento constante) é, a princípio, um acoplador variável. Este resultado foi observado variando-se a razão de acoplamento do dispositivo e medindo-se a extinção de polarização (Figura 4.10)

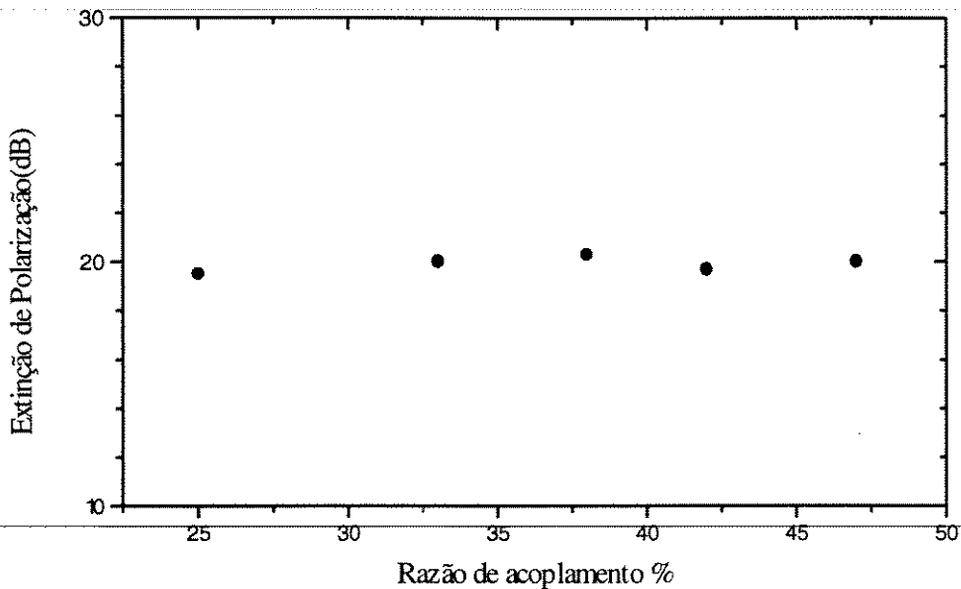


Figura 4.10 - Extinção de polarização em função da razão de acoplamento.

Para checar a estabilidade térmica do acoplador AMP, o líquido que fica entre as matrizes foi substituído por uma resina termocurável, o que levou o acoplador da modalidade variável para a fixa. Aí, então, este foi submetido a uma variação de temperatura de 60 °C, tendo apresentado uma variação na razão de acoplamento inferior a 0,5 % / °C (Figura 4.11).

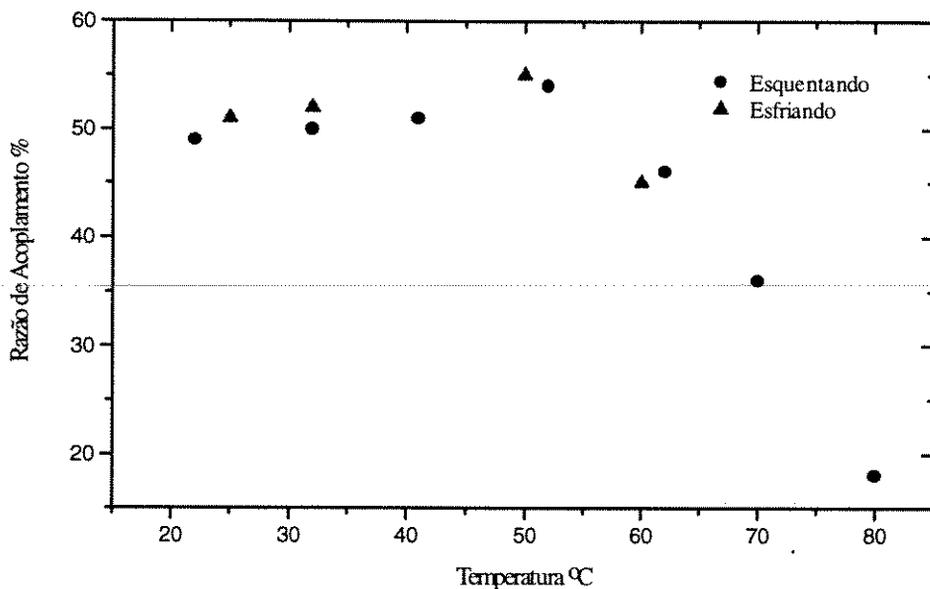


Figura 4.11 - Caráter reversível da estabilidade térmica.

Esta variação da razão de acoplamento é um processo reversível com a temperatura, ou seja, aumentando a temperatura, a razão de acoplamento diminui, voltando ao valor inicial com a diminuição da temperatura.

Em resumo, a técnica proposta neste trabalho permitiu a fabricação de acopladores com extinção de polarização superior a 27 dB, sendo este valor semelhante à extinção de polarização da fibra íntegra. Além disso, verificou-se que o valor da E_p independe da razão de acoplamento e apresenta uma variação reversível com a temperatura da ordem de 0,5 %/°C.

Capítulo V

5.DISTRIBUIDOR ESTRELA POR TROCA IÔNICA (DET)

5.1 Introdução

Os dispositivos ópticos planares do tipo acopladores, WDM e distribuidores de potência óptica confeccionados em vidro, são dispositivos muito importantes para Sistemas de Comunicação Óptica, em virtude de sua baixa perda, alto desempenho, compatibilidade com as fibras ópticas comerciais, facilidade de produção em massa e seu baixo custo.

Este tipo de guia óptico pode ser confeccionado por várias técnicas, entre as quais destacamos SiO_2 sobre silício^[87], troca iônica em substratos vítreos^[88] e dispositivos à base de polímeros^[89]. A configuração de divisor de potência óptica mais utilizada é aquela que associa vários Y's em cascata. Um dos únicos requisitos necessários para utilizá-la com eficiência é que cada ramificação seja monomodo, simétrica e que sua curva de transição entre os diversos ramos seja suave, para minimizar as perdas por radiação. Nesta Tese, escolheu-se a técnica de troca de íons de prata (Ag^+) por íons de sódio (Na^+) presentes nos vidros BK7 ou *soda lime*, para desenvolver os Divisores de Potência Óptica enterrados^[88] do tipo 1x4, 1x8, 1x16. A escolha desta técnica se deve, principalmente, a sua simplicidade e ao seu baixo custo.

Além disso, esta técnica já é bem conhecida e vem sendo utilizada, com sucesso, para fabricar diversos dispositivos, tais como: “*tapers*”^[90], WDM^[91], acopladores 1 x N^[92,93,94], separadores de polarização^[95], lasers^[96] e sensores^[97].

Embora os acopladores para $N = 2, 4, 8, 16$ já sejam comercialmente disponíveis, seus detalhes de fabricação não são de domínio público. Vemos, por exemplo, que enquanto a IOT usa as propriedades dos vidros para fazer troca iônica de $\text{Ag}^+ - \text{Na}^{+[92]}$, a Corning Européia usa troca de $\text{Tl}^+ - \text{Na}^+$ ou $\text{Tl}^+ - \text{K}^+$, em duas etapas, para enterrar os guias de onda superficiais fabricados^[93].

Neste trabalho, a confecção do DET cumpriu três etapas distintas :

- Projeto
- Fabricação do DET
- Caracterização óptica do DET

A seguir, apresenta-se descrição detalhada de cada uma dessas etapas.

5.2 Projeto do DET

O projeto do DET 1 x 16 tem, como motivo principal, uma ramificação em Y com as seguintes características geométricas :

- angulo do Y menor ou igual a 1° , para minimizar perdas por transmissão.
- Y com dois raios de curvatura diferentes, para reduzir o comprimento do dispositivo, e manter o compromisso de espaçamento de $250 \mu\text{m}$ entre os guias de onda de saída (Fig. 5.1).

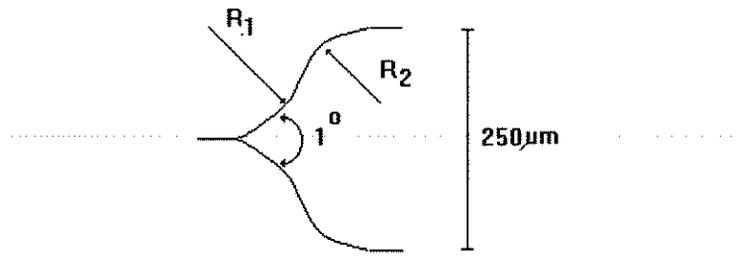


Fig 5.1 - Desenho esquemático do Y utilizado na máscara do DET 1x16

A repetição ordenada do Y gerou um dispositivo 1 x 16 com 30 mm (Fig. 5.2) de comprimento que pode ser duplicado para 1 x 32 ou segmentado em dispositivos 1 x 8 ou 1 x 4.

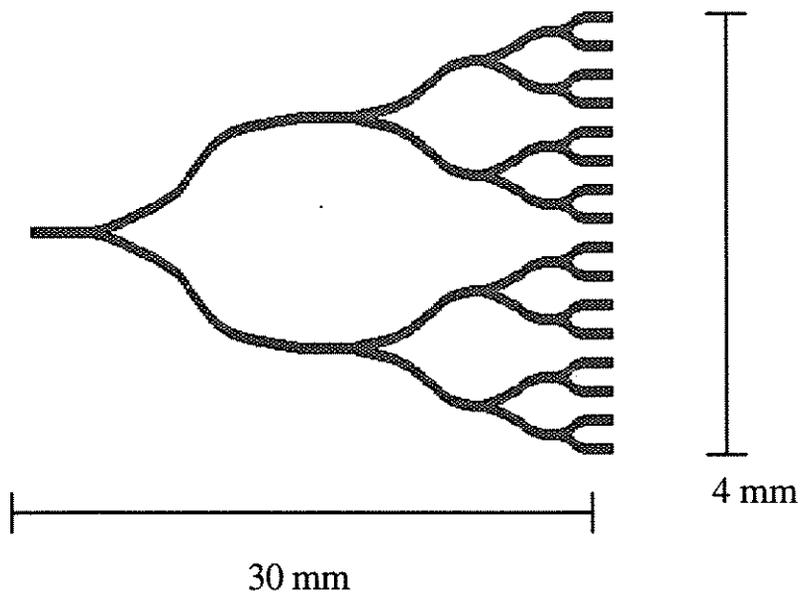


Fig 5.2 - Distribuidor Estrela 1x16

Os dados do projeto deram origem a um arquivo em CIF. Este foi transformado para o formato DASY, pelo Centro de Componentes Semicondutores (CCS - Unicamp), responsável pelo desenvolvimento da primeira máscara do DET.

As máscaras foram executadas usando a técnica de escrita por e-beam, com resolução de linha de $0,5 \mu\text{m}$ (Sistema de Litografia por Feixe de Elétrons ZBA-21-Jenoptik).

Os dispositivos desta primeira máscara têm larguras de linha de 6 ou 8 μm , comprimento de 30 mm e raios de curvatura de $R_1 = 50 \text{ cm}$ e $R_2 = 30 \text{ cm}$.

5.3 Fabricação do DET

5.3.1 Fundamentos de Troca Iônica

A estrutura do vidro é representada, esquematicamente ^[98], na Fig. 5.3

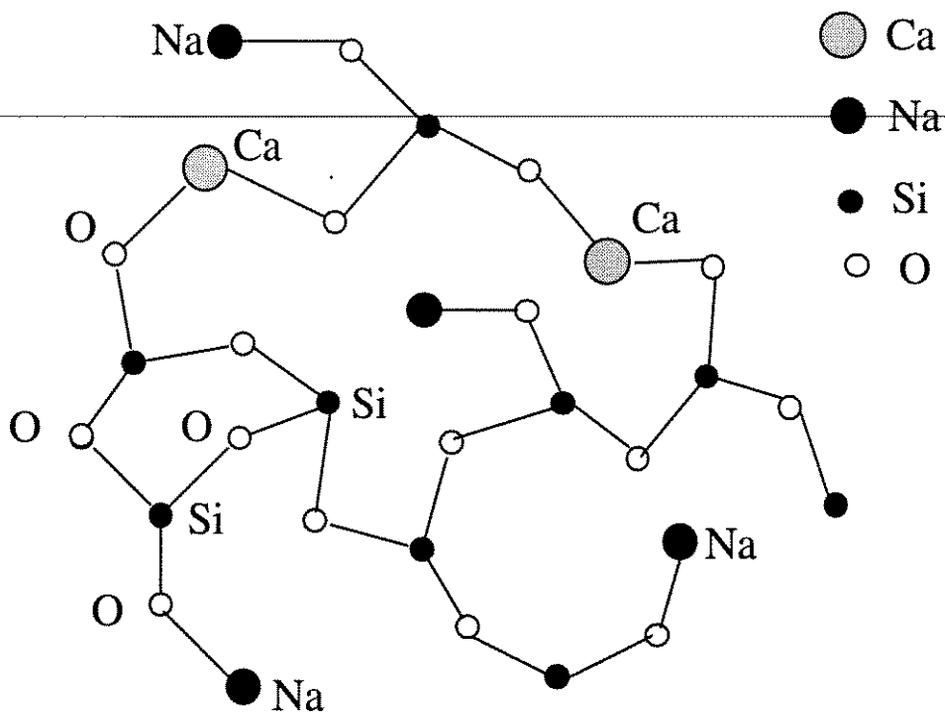


Figura - 5.3 - Estrutura do vidro utilizado como substrato

Nos vidros silicatos, os íons de Na^+ estão ligados à estrutura do vidro por interações iônicas fracas, enquanto os átomos de Si e O têm ligações covalentes fortes. Por isso, quando o substrato vítreo é introduzido num sal fundido, a uma temperatura elevada, os íons do sal trocam com os íons de Na^+ próximos à superfície, migrando para o interior do vidro, por difusão (Fig. 5.4) e mudando o índice de refração local ^[98].

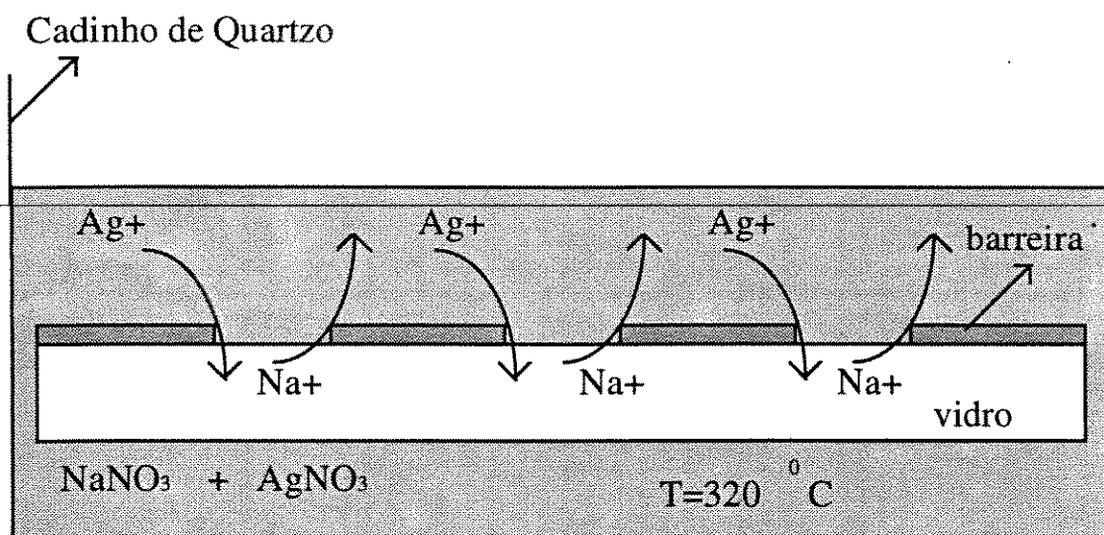


Figura 5.4 - Mecanismo de troca de íons de Na^+ por Ag^+

Esta variação do índice de refração, pode ocorrer porque o novo íon que entrou na matriz, tem tamanho e polarizabilidade diferente.

Segue-se a Tabela I, que nos dá uma visão geral de alguns parâmetros relevantes no processo de Troca Iônica.

Tabela I - Parâmetros relevantes na Troca Iônica^[88]

Íon	Polarizab. $\lambda=D$ (Å ³)	Raio Iônico (Å)	Sal	Ponto de fusão(°C)	Ponto de Decomp. (°C)	Var.de Índice
Na ⁺	0,41	0,95	NaNO ₃	307	380	-
Li ⁺	0,03	0,65	LiNO ₃	264	600	0,01
Tl ⁺	5,2	1,49	TlNO ₃	206	430	0,1
			TlSO ₄	632		0,1
Cs ⁺	3,34	1,65	CsNO ₃	414	-	0,03
Ag ⁺	2,4	1,26	AgNO ₃	212	444	0,09
K ⁺	1,33	1,33	KNO ₃	334	400	0,009
Ag ⁺	2,4	1,26	filme	-	-	0,001
Ag ⁺	2,4	1,26	filme+camp	-	-	0,025

Os íons mais utilizados para aumentar o índice de refração local são: Ag⁺, K⁺ e Tl⁺.

E os vidros comerciais mais usados na confecção dos dispositivos planares são os vidros de *soda lime* e BK7, cujas características são apresentadas na Tabela II.

Tabela II
Composição dos vidros *Soda Lime* e BK7^[100]

SODA LIME n=1,5165		BK7 n=1,5151	
componente	peso %	componente	peso %
SiO ₂	73,10	SiO ₂	69,6
Na ₂ O	13,80	B ₂ O ₃	9,9
CaO	8,60	Na ₂ O	8,4
MgO	4,00	K ₂ O	8,4
SO ₃	0,30	BaO	2,5
Al ₂ O ₃	0,10	traços	1,2
Fe ₂ O ₃	0,10		
K ₂ O	0,04		
TiO ₂	0,01		

Como podemos observar na Tabela II, os vidros comerciais BK7 e *soda lime* são ricos em Na⁺. Estes íons, por terem alta mobilidade, trocam facilmente com os íons dos sais, quando estes são submetidos a uma temperatura alta ($T > 320\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A razão de troca de íons depende de vários parâmetros que precisam ser controlados. Entre eles podemos citar o par de íons, a composição do vidro, a temperatura e a fração molar do sal utilizado.

5.3.2 Fabricação

A fabricação dos dispositivos planares confinados cumpriu 5 etapas :

- Determinação das condições de troca iônica
- Fotogravação
- Troca Iônica
- Aplicação de Campo
- Processamento de bordas

5.3.2.1 Determinação das Condições de Troca Iônica

Como o objetivo deste capítulo é fabricar guia de onda confinado, monomodo, compatível com a fibra monomodo em 1,3 e 1,55 μm , foi importante determinar parâmetros tais como temperatura, concentração do sal e o tempo de difusão.

Em nossas experiências foram utilizados dois tipos diferentes de substrato :

- *soda lime* ($n = 1,5165$)
- BK7 ($n = 1,5151$)

Na primeira etapa, foram feitos guias de onda, usando difusão térmica.

Para determinar o perfil de índice dos guias gerados e a razão de troca, em cada vidro, fizeram-se várias sequências de experimentos para os vidros citados.

Manteve-se uma concentração constante do dopante ($N_{Ag^+} = 0,1\%$ fração molar) e variou-se o tempo de troca, mantendo-se a temperatura constante de $320\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Na Fig. 5.5, a profundidade de difusão foi traçada em função da raiz quadrada do tempo de troca iônica.

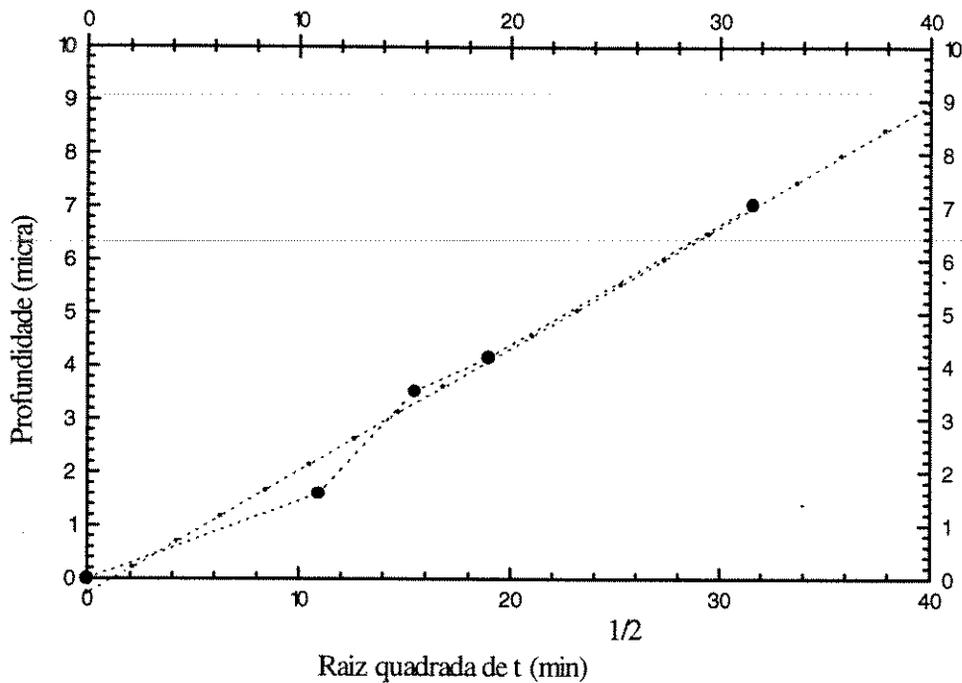


Figura 5.5 - Profundidade x Raiz quadrada do tempo de troca em BK7 a 320 °C.

Concentração de prata no sal = 0,1%.

Através deste gráfico, calculou-se os coeficientes de difusão no vidro *soda lime* ($D_{SL} = 27,22 \mu\text{m}^2 / \text{h}$) e no vidro BK7 ($D_{BK7} = 3,26 \mu\text{m}^2 / \text{h}$) à temperatura de 320 °C e constatou-se que, para gerar um guia de onda nesta temperatura, com dimensões compatíveis com as fibras ópticas (6 μm) e monomodo em 1,55 μm , precisamos realizar uma troca iônica durante 20 horas para o vidro BK7 e uma troca de 2 horas para o vidro *Soda Lime*, quando as aberturas de barreira forem de 6 μm .

Estes valores estão compatíveis com os apresentados na literatura ^[101].

Escolhido o substrato e determinado o tempo de troca para gerar os guias de onda desejados, o vidro foi submetido a um processo de limpeza criterioso para remoção de partículas espúrias e de gorduras que pudessem comprometer a etapa seguinte da fotogração.

5.3.2.2 Fotogração

A fotogração dos dispositivos em substratos vítreos pode ser feita pela técnica de *etching* ou pela técnica de *lift-off*.

(a) Técnica de *etching*

A Fig. 5.6 mostra a fotogração dos dispositivos pela técnica de *etching*. Esta técnica envolve 5 etapas :

1- Deposição de filme de alumínio, com 2300 Å de espessura (barreira), no substrato vítreo.

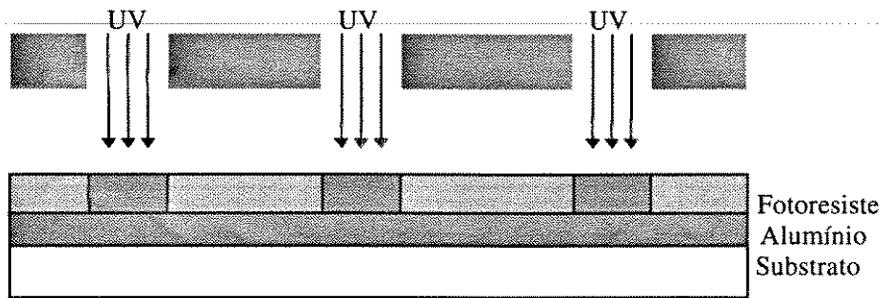
2- Deposição do filme de fotoresiste, com espessura uniforme (*spinner*), sobre a barreira de alumínio.

3- Sensibilização do fotoresiste através da máscara litográfica.

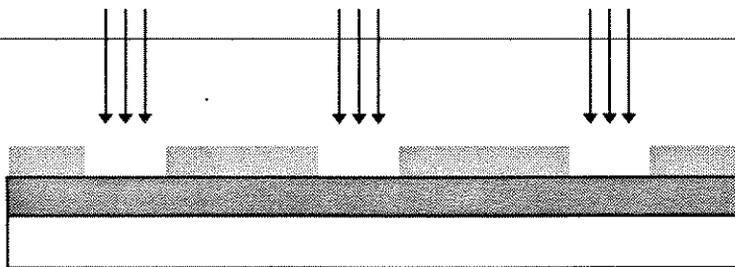
4- Revelação

5- Abertura do dispositivo, na barreira de alumínio, por *etching*.

FOTOGRAVAÇÃO - *ETCHING*



REVELAÇÃO + *ETCHING*



SUBSTRATO FINAL



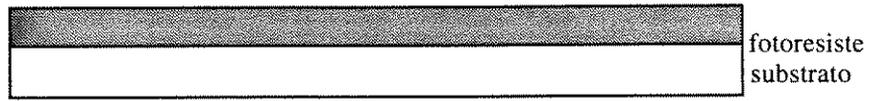
Figura 5.6 - Fotografação dos dispositivos pela técnica de *etching*

(b) Técnica de *Lift-Off*

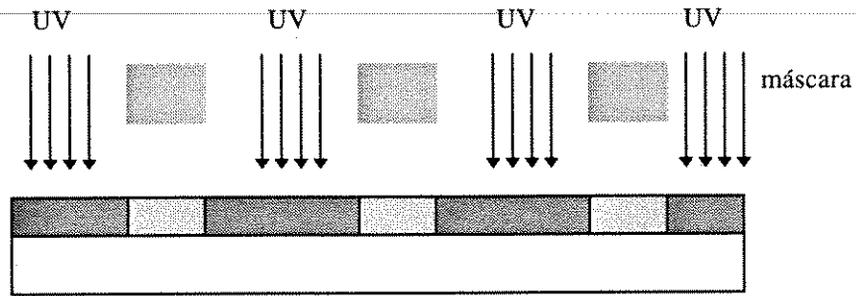
A técnica de *Lift-Off* (Fig. 5.7), segue as seguintes etapas :

- 1- Deposição de filme de fotoresiste.
 - 2- Sensibilização e revelação do fotoresiste através da máscara litográfica
 - 3- Deposição de 2300 Å de barreira de alumínio.
 - 4- *Lift-Off*
-

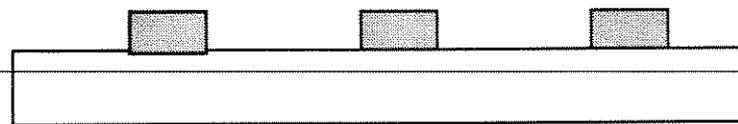
DEPOSIÇÃO FOTORESISTE



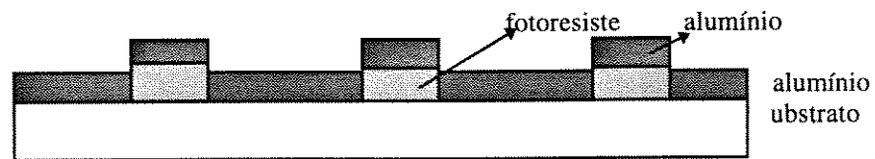
SENSIBILIZAÇÃO



REVELAÇÃO



DEPOSIÇÃO - BARREIRA



SUBSTRATO FINAL

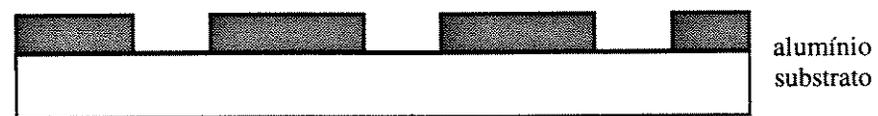


Figura 5.7 - Fotogravação do dispositivo pela técnica de *Lift-Off*

5.3.2.3 Troca Iônica por Difusão Térmica

O processo de troca iônica, por difusão térmica, foi realizado num forno vertical (Fig. 5.8), à temperatura de 320-330 °C. Este forno é provido de um cadinho de quartzo longo e um mecanismo automático de alimentação que sustenta um suporte de amostras, confeccionado em quartzo. Utilizou-se sal de NaNO_3 fundido, com 0,1 % de fração molar de AgNO_3 , para gerar uma variação de índice $\Delta n = 0,013$, no vidro *soda lime*.

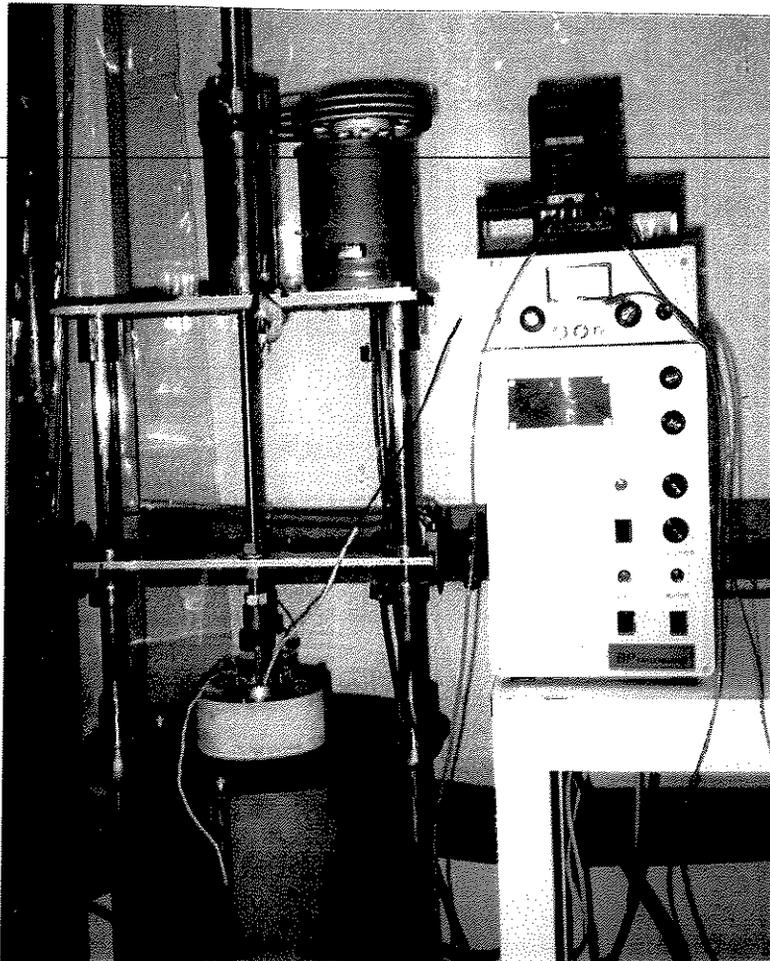


Figura 5.8 - Forno vertical

Para o vidro BK7, utilizou-se uma mistura de 67% NaNO_3 , 33% de KNO_3 e observou-se o mesmo Δn . O suporte foi projetado de forma que a amostra, uma placa de BK7 ou *Soda Lime* de 20 x 40 x 1mm, permanecesse na posição horizontal e, portanto, livre de eventuais gradientes de concentração do sal ou gradiente de temperatura no interior do forno.

Após os materiais químicos (sais nitratos) serem carregados no cadinho de quartzo, posicionou-se o porta amostra no forno que, só então, foi ligado.

Enquanto o forno era aquecido, iniciou-se a descida da amostra, com uma velocidade controlada, através do mecanismo de abaixamento automático. O movimento foi interrompido, temporariamente, antes de a amostra mergulhar no sal, para que todo o sistema (cadinho+sal+amostra) entrasse em equilíbrio térmico. Só então a amostra foi mergulhada no sal e iniciou-se a contagem do tempo de troca iônica para formação dos guias ópticos superficiais.

Transcorrido o tempo necessário para formação dos guias de onda, que no presente caso foi de 2 horas para o *soda lime*, iniciou-se sua retirada do forno de forma lenta, para evitar choques térmicos.

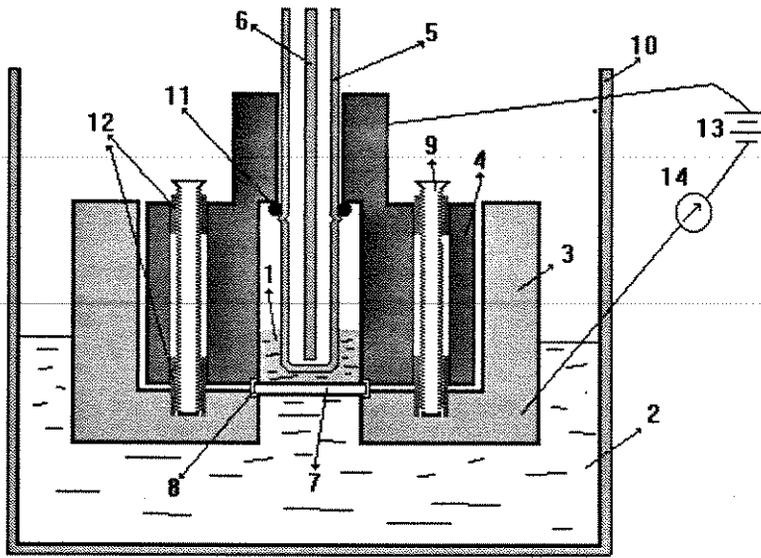
5.3.2.4 Aplicação de Campo

Sabe-se que a difusão térmica gera um perfil de índice que depende da composição do vidro utilizado e do tipo de íons trocados. Em geral, o perfil de índice é gradual e não pode ser representado por uma função analítica. Entretanto, podem-se produzir guias de ondas com perfil degrau se, durante a troca iônica, for aplicado um campo elétrico através do substrato. Se este campo for suficientemente grande, a profundidade do guia de onda terá uma dependência quase linear com o tempo de troca. Isto permite gerar guias de onda mais profundos num tempo razoável, mesmo que o coeficiente de difusão e a mobilidade iônica sejam baixas, a exemplo do vidro BK7. Portanto, a aplicação do campo elétrico, num segundo passo de uma troca sem dopante, resulta num guia de onda enterrado cujo pico do perfil de índice está bem abaixo da superfície do vidro. Uma escolha criteriosa de parâmetros, no primeiro e segundo estágio de processo, permite a fabricação de guias de onda com perfil de índice compatível com os das fibras ópticas às quais deverão estar acoplados. Estes guias têm baixas perdas por espalhamento e excelente qualidade de acoplamento com as fibras ópticas.

Embora a troca iônica de Ag^+ - Na^+ em vidros *soda lime* e BK7 seja conhecida, esta é a primeira vez, que seja de nosso conhecimento, em que foram produzidos dispositivos enterrados, em BK7, por este método. Inicialmente, fez-se troca iônica,

sob a ação de campo elétrico, em vários substratos vítreos de *soda lime* e de BK7, para estabelecer a dependência da profundidade do filme gerado com o tempo de troca iônica. Para tanto, utilizou-se, em *soda lime*, um campo constante de 100 V/mm à temperatura de 320 °C e em BK7, um campo de 160 V/mm a 330 °C.

Neste trabalho, só os resultados em BK7 serão apresentados. A Fig. 5.9 mostra em (a) o sistema de troca iônica, com aplicação de campo, tendo em destaque o segurador de amostras já imerso no sal fundido e em (b) um desenho esquemático da aplicação do campo elétrico sobre a amostra.



(a)

1-Sal com (1ªetapa) ou sem (2ªetapa) prata

2-Sal sem prata

3-Parte inferior do porta amostra

4-Parte superior do porta amostra

5-Tubo de sílica

6-Termopar

7-Vidro (amostra)

8-Fita teflon

9-Parafuso

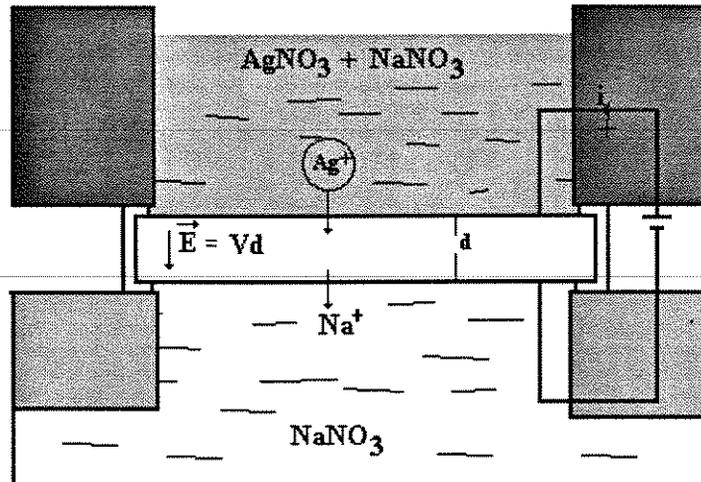
10-Cadinho Sílica

11-O'ring (Viton)

12-Arruela (cerâmica)

13-Fonte de tensão

14-Amperímetro



(b)

Figura 5.9 - Troca Iônica (a) Suporte da amostra (b) Aplicação de campo elétrico

O segurador de amostras é formado de duas partes metálicas de alumínio.

- parte inferior (Fig. 5.10 (a))
- parte superior (Fig. 5.10 (b))

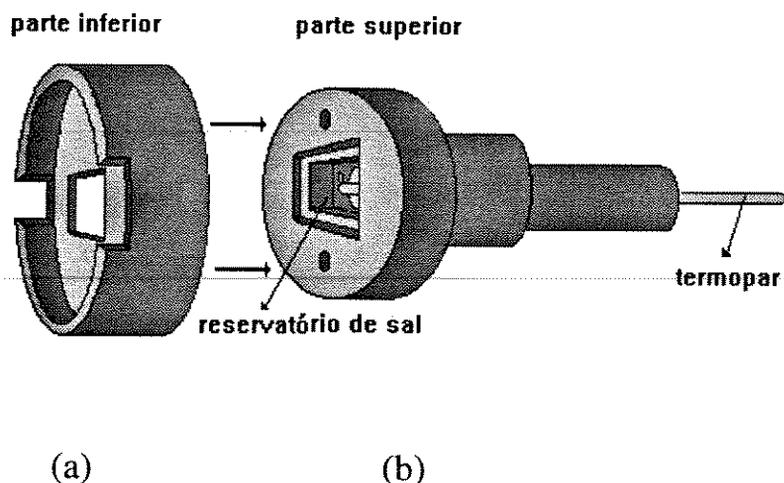


Figura 5.10 - Suporte de amostra (a) parte inferior (b) parte superior

A parte superior, de secção circular, possui uma cavidade retangular, em torno da qual existe um rebaixo de 0,5 mm para acomodar a amostra de vidro de 1,0 mm de espessura. Esta tem suas bordas envolvidas com fita teflon, não só para evitar vazamento de sal da cavidade superior para a inferior, como também para preservar o isolamento elétrico entre as partes. O sal que fica acima da amostra é composto de 67% de NaNO_3 e 33% de KNO_3 , em fração molar, com 0,1% de AgNO_3 na primeira fase da troca e sem AgNO_3 , na segunda fase. O suporte inteiro é imerso numa mistura de sal fundido com 67% de NaNO_3 e 33% de KNO_3 contido no cadinho de quartzo, a uma temperatura de 330 °C.

A adição de KNO_3 tem duas finalidades :

- prevenir fuga de K^+ do vidro BK7
- abaixar o ponto de fusão do sal

O porta - amostra pode ser abaixado ou elevado, com velocidade controlada, usando um sistema motorizado. O campo elétrico foi aplicado através de fios de cobre, ligados às duas partes do suporte. O próprio sal fundido atuou como eletrodo e a corrente iônica não fluía antes que o sal, em contato com ambas as faces do vidro, estivesse fundido. As partes superior e inferior do porta - amostra foram presas por um parafuso, provido de uma ruela de cerâmica, para isolar as duas partes, enquanto a amostra foi mantida firme, entre dois anéis de teflon.

A profundidade dos guias gerados, por difusão térmica, sem aplicação de campo, foi traçada em função da raiz quadrada do tempo de troca iônica (Fig. 5.11), para calcular o coeficiente de difusão D , dado por :

$$d = 2 \sqrt{Dt} \quad (5.1)$$

de onde se calculou o valor de $D = 2,3 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$ para o vidro BK7.

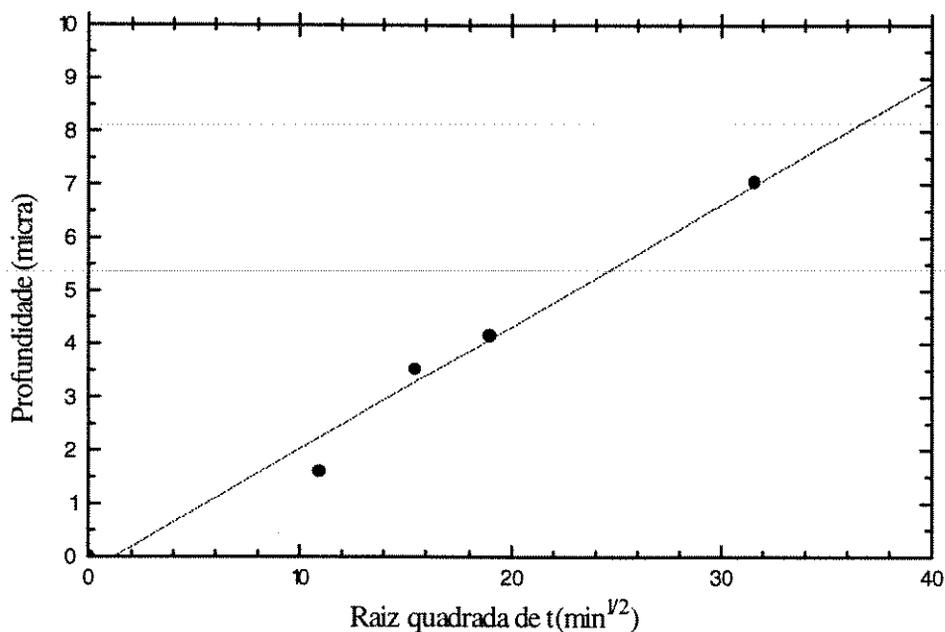


Figura 5.11 - Profundidade do guia em função da raiz quadrada do tempo de troca iônica. Temperatura de troca 330°C. Vidro BK7 sem campo.

Para os valores experimentais considerados, foram necessárias de 15 a 20 horas para gerar guias de onda com profundidade de 6 a 7 μm . Este valor está consistente com os resultados obtidos na Ref.101, se a diferença de temperatura, entre os dois trabalhos, for considerada.

Para guias de onda planares, gerados sob a aplicação de campo elétrico, aplicou-se 160 V, através de substratos de 1 mm de espessura, durante 3 horas e obteve-se

guias de onda com 6 μm de profundidade. Isto mostrou que a presença do campo elétrico acelerou o processo em quase uma ordem de grandeza.

Ignorando a difusão térmica, a profundidade efetiva pode ser escrita como

$$d = \mu E t \quad (5.2)$$

onde μ é a mobilidade, E o campo elétrico aplicado e t o tempo de troca iônica.

Da Equação (5.2) obtivemos $\mu = 6 \times 10^{-15} \text{ m}^2 / \text{Vs}$. E, usando a relação de Einstein

$$D = \mu K T / e \quad (5.3)$$

obtivemos $D = 3 \times 10^{-16} \text{ m}^2 / \text{s}$, um valor próximo ao obtido para o guia difundido termicamente. A diferença observada nos dois valores pode ser atribuída ao fato de termos considerado válida a relação de Einstein nos vidros.

Já que o coeficiente de difusão e a mobilidade iônica dependem da temperatura, usou-se a variação da corrente iônica com a temperatura para estimar a energia de ativação Q nas Equações (5.4) e (5.5)

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (5.4)$$

$$\mu = \mu_0 e^{-Q/RT} \quad (5.5)$$

onde D_0 e μ_0 são constantes e R é a constante dos gases.

Lembrando que a corrente iônica é proporcional à mobilidade iônica e que o campo elétrico aplicado (160 V/mm) é suficientemente grande para ignorar a contribuição puramente térmica, podemos exprimir a corrente **I** como

$$I = I_0 e^{-Q/RT} \quad (5.6)$$

onde I_0 é constante.

O gráfico de $\ln I$ versus $1/T$ gera uma linha reta, como pode ser observado na Fig. 5.12.

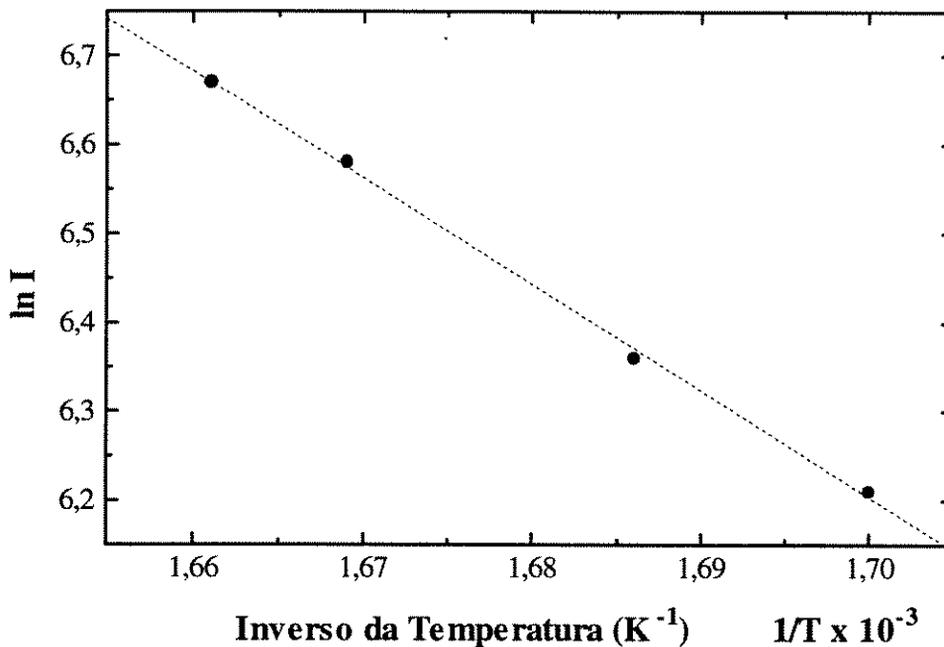


Figura 5.12 - Gráfico $\ln I \times 1/T$

A inclinação da reta nos dá $Q = 10 \times 10^4$ J/mole, valor este em excelente concordância com a Ref.102.

Neste processo de geração de guias de onda sob, aplicação de campo elétrico, obteve-se uma mudança de índice de 0,013 para 0,1% de concentração de prata, o que está consistente com outros autores que geraram guias de onda sem aplicação de campo elétrico.

Baseados nos resultados apresentados, determinamos que com 0,1% de prata e a uma temperatura de 330 °C são necessárias 20 horas para gerar um guia de onda monomodo em 1,55 μm , sem campo elétrico aplicado e 3 horas com campo elétrico, usando uma máscara de 6 μm de largura de linha. Embora a aplicação do campo elétrico, na segunda etapa, mude o perfil de índice (diminui a diferença máxima de índice , aumenta a largura do guia e torna o guia simétrico), o guia ainda permanece monomodo em 1,55 μm (Fig. 5.13).

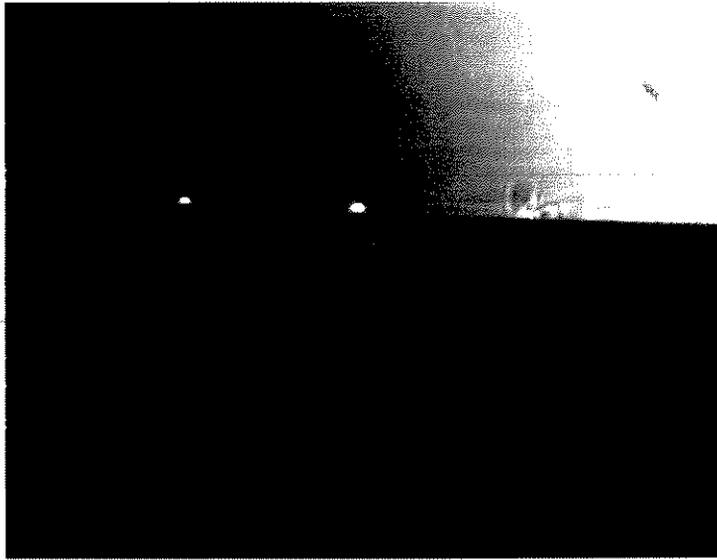


Figura 5.13 - Guia de onda enterrado

5.3.2.5 Processamento de Bordas

A caracterização óptica dos dispositivos planares, com guias confinados, requer o acoplamento de fibras ópticas aos guias de onda. Para que este acoplamento seja eficiente é necessário que os guias disponham de entradas e saídas opticamente polidas, para facilitar o acoplamento das fibras e minimizar as perdas por espalhamento. Outro requisito importante é que a aresta, entre a superfície de entrada e a superfície que contém o guia, esteja perfeitamente preservada após o polimento (Fig. 5.14(a)), caso contrário, corre-se o risco de perder-se a entrada do

guia (Fig. 5.14(b)), o que poderá aumentar as perdas e dificultar o acoplamento com a fibra.

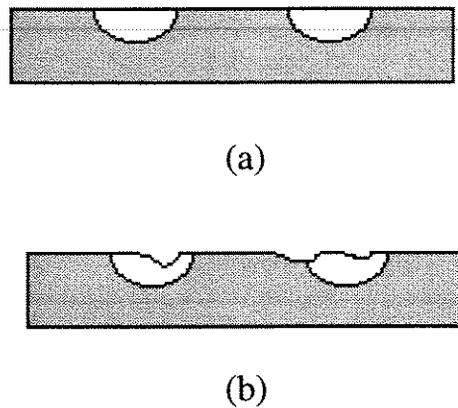


Figura 5.14 - (a) Aresta preservada durante polimento (b) Aresta não preservada durante polimento

Para se obter polimento de qualidade e acoplamento eficiente do dispositivo planar com a fibra, estabeleceu-se um procedimento, sistemático, de preparação de bordas dos dispositivos, que passa a ser descrito.

A preparação de bordas é iniciada pela proteção da superfície a ser preservada.

Esta é colada a um outro vidro de mesma qualidade e tamanho, tendo-se o cuidado de observar que a superfície que contém os guias é a superfície que está sendo protegida (Figura 5.15).

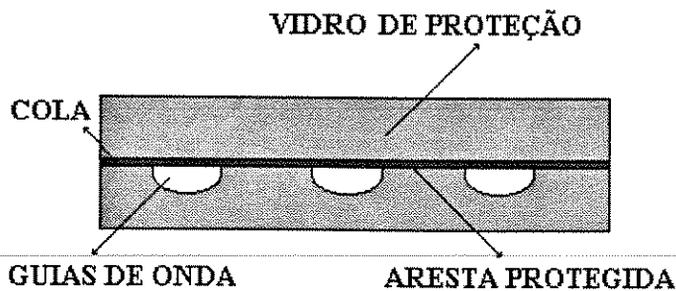


Figura 5.15 - Proteção de guias de onda, durante polimento

A seguir, a amostra é montada e processada, no JIG de polimento, o qual garante o paralelismo das faces de entrada e saída do guia de onda (Fig. 5.16). O processamento é iniciado pelo desbaste da amostra com Óxido de Alumínio de 5 μm até que a superfície fique nivelada. Segue-se a remoção dos riscos mais profundos, com Óxido de Alumínio de 3 μm e finalmente, procede-se ao polimento com óxido de cério 0,5 μm . A amostra é, então, descolada do JIG e submetida a um processo químico de limpeza para remoção da cola, estando pronta, a partir daí, para ser caracterizada.

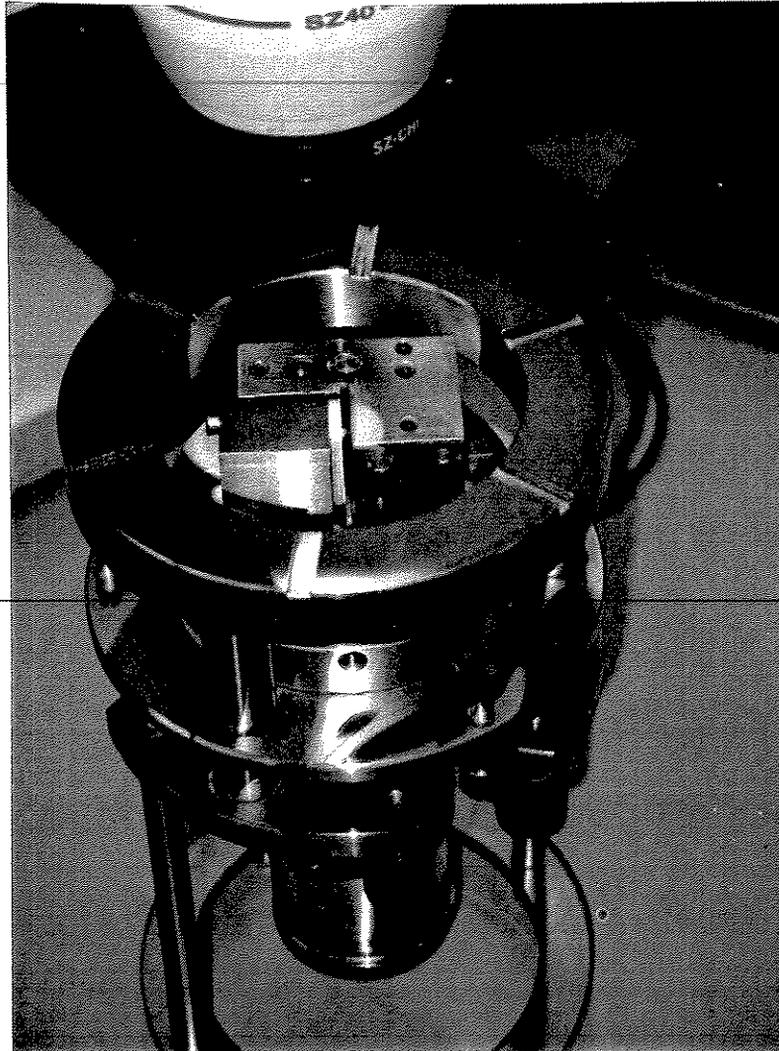


Figura 5.16 - Sistema JIG+amostra

5.3.3 Caracterização Óptica

5.3.3.1 Caracterização Óptica dos Guias de Onda Superficiais (DET 1 x 8)

O DET 1 x 8, com 2,5 cm de comprimento, foi confeccionado em vidro *Soda Lime*, através da troca iônica de Sódio com Prata.

Para caracterizá-lo, opticamente, foram feitas medidas nos seguintes guias:

- Guia reto
- DET 1 x 8

Para a caracterização óptica do guia reto, lançou-se a luz de um laser 1,3 μm , através de uma fibra óptica monomodo, na entrada do guia e mediu-se a potência óptica de saída, através de uma fibra óptica multimodo. A perda total de inserção medida foi 6,3 dB. Considerando que a perda devido ao acoplamento fibra - guia é da ordem de 0,5 dB^[88] e lembrando que o dispositivo tem 2,5 cm de comprimento, podemos afirmar que a perda por propagação é de 2,1 dB / cm.

A medida de perda do DET foi feita de maneira análoga. Lançou-se luz no guia de entrada e mediu-se a potência óptica em cada uma das 8 portas de saída. A fibra

multimodo, na saída, foi utilizada para garantir a situação de “pin-hole” de isolamento de cada braço. A perda medida, para cada porta incluindo acoplamento fibra - DET, pode ser observada na Fig. 5.17, sendo a perda média $17,9 \pm 5\text{dB}$.

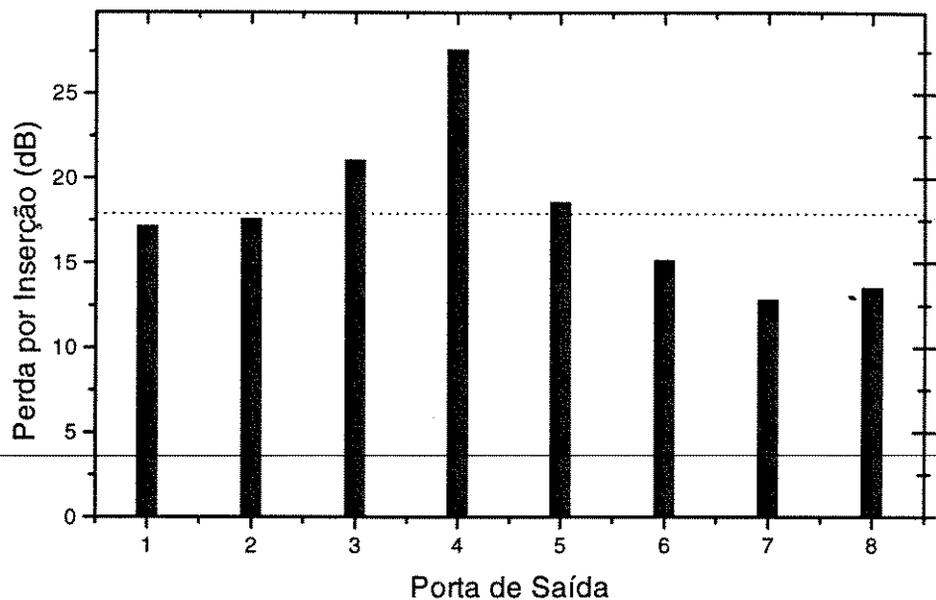


Figura 5.17 - Medida de perda por inserção do DET 1 x 8

Dos resultados acima, deduz-se que, a perda média de cada braço do DET é 17,9 dB, dos quais 1,0 dB devido aos acoplamentos de entrada e saída da luz no guia e 5,3 dB devido às perdas por propagação (perda do guia reto). Portanto, a perda em decorrência das estruturas em Y e da presença de curvaturas no guia óptico é de 11,6 dB, o que corresponde a uma perda de 3,8 dB para cada Y.

5.3.3.2 Caracterização Óptica dos Guias de Onda Enterrados (DET 1 x 16)

O procedimento de caracterização dos guias de onda enterrados foi idêntico ao dos guias de onda superficiais, sendo que os guias de onda enterrados tinham 3,0 cm de comprimento, a configuração de guias de 1 x 16 e a presença de um dispositivo Y (o dispositivo em Y), que nos forneceu um parâmetro adicional, a perda do Y.

Neste novo conjunto de dispositivos foi medida uma perda por inserção de 6,8 dB para o guia reto, dos quais 1,0 dB corresponde às reflexões de entrada e saída do guia. Para o guia em Y, mediu-se 7,4 dB de perda por inserção por porta, sendo a perda total de inserção, do guia em Y, de 10,4 dB. A comparação destes resultados indica uma perda de 3,6 dB decorrente da ramificação em Y. Lembrando que o dispositivo mede 3,0 cm de comprimento, podemos afirmar que a perda por transmissão no guia enterrado reto é de 1,9 dB / cm estando, portanto, 0,2 dB abaixo da perda do guia superficial, como já era esperado.

Como no DET 1 x 16, havia algumas saídas interrompidas e ramos defeituosos, nem todas as medidas de perdas, para cada uma das 16 saídas, foram consideradas. Somente os dois melhores casos, 25,0 dB e 26,4 dB, foram tratados em detalhes.

5.3.3.3 Discussão

O enterramento das estruturas de guiamento, abaixo da superfície tem dois objetivos:

1. Otimizar a simetria do perfil de índice de refração do guia.
2. Minimizar perdas.

A simetria do perfil de índice é essencial para maximizar o acoplamento entre os guias e as fibras, cujo perfil tem simetria circular. A minimização das perdas está relacionada às perdas por transmissão causadas por irregularidades superficiais do substrato de vidro. Portanto, o enterramento do guia abaixo da superfície reduz uma significativa fonte de perdas.

Este fato ficou comprovado ao se comparar as medidas de perda dos guias superficiais e dos enterrados. Em virtude de problemas ocorridos no processo Litográfico de definição dos canais, na barreira de alumínio, a qualidade dos guias enterrados ficou muito inferior à dos guias superficiais. Contudo, a perda /cm dos guias enterrados ficou 0,2 dB /cm abaixo da perda dos guias superficiais, como já era previsto.

Capítulo VI

6. CONCLUSÃO

Este trabalho enfocou o desenvolvimento dos dispositivos ópticos passivos confeccionados através das Técnicas de Polimento e de Troca Iônica. Foi feito um levantamento bibliográfico que definiu o estado da arte mundial destes dispositivos. Em seguida, após rápida revisão da teoria de acoplamento por campo evanescente, estabeleceu-se, com detalhes, toda a sistemática para produzir a matriz que serve de insumo básico à formação de quaisquer dispositivos por polimento.

Utilizando esta matriz foram desenvolvidos os seguintes dispositivos :

1. Acoplador Óptico a Fibra do tipo 3 dB.
2. Acoplador Óptico a Fibra do tipo WDM.
3. Acoplador Óptico que preserva a polarização da luz.
4. Atenuador Óptico Variável a Fibra.

Todos estes dispositivos foram caracterizados e, de uma maneira geral, apresentaram perdas inferiores a 0,2 dB e diretividade superior a 50 dB. Para o WDM a isolação entre canais foi superior a 20 dB, ficando a isolação de polarização, para o caso do acoplador que preserva o estado de polarização da luz, em torno de 27 dB, como na fibra isolada.

Embora o processo de polimento utilizado tenha gerado dispositivos reprodutíveis e com baixas perdas, a técnica mostrou-se muito artesanal e laboriosa sendo indicada apenas para geração de protótipos laboratoriais. A principal limitação da técnica foi a utilização do líquido de casamento de índice entre as matrizes que compõem o dispositivo. Por ter seu índice de refração extremamente sensível à temperatura ($\Delta n \approx 0,0001/^{\circ}\text{C}$), este líquido altera em demasia as características ópticas dos dispositivos produzidos, quando estes são submetidos a oscilações de temperatura. Este é o principal fato que inviabiliza a utilização destes dispositivos em sistemas de comunicações ópticos comerciais.

Uma sequência natural deste trabalho poderá ser o estudo de materiais alternativos que possam substituir o líquido de casamento de índice utilizado entre as matrizes, por materiais do tipo resinas UV e de cura térmica. Tais materiais precisam oferecer maior estabilidade térmica e mecânica e preservar as características ópticas dos dispositivos. Somente assim, poder-se-á pensar na utilização destes dispositivos em aplicações sistêmicas de telecomunicação.

Pela técnica de Troca Iônica foram desenvolvidos os Distribuidores Estrela Planares 1 x N (1 x 4, 1 x 8, 1 x 16), em uma etapa (sem aplicação de campo elétrico) e em duas etapas (com aplicação de campo elétrico).

O desenvolvimento dos dispositivos planares foi um trabalho bastante abrangente.

Nele conseguiu-se :

- projetar um dispositivo divisor de potência 1 x 16.
- confeccionar uma máscara litográfica utilizando o projeto mencionado.
- confeccionar o dispositivo projetado na superfície de substratos BK7 e *soda lime* .
- enterrar o guia de onda gerado, para minimizar perdas.
- estabelecer uma sistemática de caracterização óptica dos dispositivos gerados.

Os dispositivos superficiais 1 x N desenvolvidos apresentaram perdas de propagação de 2,1 dB/cm, enquanto os dispositivos enterrados apresentaram perdas de propagação de 1,9 dB/cm. Como já se esperava, a perda de propagação dos dispositivos enterrados ficou 0,2 dB abaixo da perda dos dispositivos superficiais, muito embora as condições geométricas do primeiro, fossem muito inferiores às do último. A perda na ramificação em Y é da ordem de 3,8 dB em guias superficiais e de 3,6 dB em guias enterrados.

A uniformidade entre as portas de saída foi prejudicada por problemas de definição de linha, ocorridos durante a fotogração da barreira de alumínio.

Para dar sequência aos trabalhos de Troca Iônica, os resultados desta pesquisa sugerem:

1. Otimização do processo litográfico de confecção da barreira de alumínio, objetivando a minimização das perdas por transmissão.
2. Trabalhos sistemáticos de aplicação de campo elétrico, visando a otimização geométrica do guia de onda e de seu enterramento, com consequente minimização das perdas de acoplamento guia - fibra e de espalhamentos superficiais.

3. Sugere-se, ainda, estudos criteriosos para que se identifiquem formas de fixação permanente e otimizada do acoplamento fibra - dispositivo, que possam gerar uma estrutura mecânica estável e utilizável em campo.

Seguem-se as publicações geradas, submetidas no transcorrer deste trabalho:

1. MONTEIRO, H.S., CELASCHI, S., JESUS, J.T. "Desenvolvimento de acopladores ópticos bidirecionais", Revista Telebrás, 28-35, (1987)^[66].
2. MONTEIRO, H.S., ARRADI, R., DINI, D.C , CARRARA, S.L.A. e CONFORTI, E., "~~Polarization preserving coupler~~" (a ser submetido à Revista Brasileira de Física)^[67].
3. JESUS, J.T., MONTEIRO, H.S., DINI, D.C. "Fabricação e caracterização de multiplexadores em comprimentos de onda utilizando fibras ópticas", 7º Simp. Bras. Telecomunicações, 240-244, (1989)^[68].
4. MONTEIRO, H.S., ARRADI, R., CELASCHI, S. "Atenuador óptico variável", Rev. de Física Apl. e Instr., 5, 1, 34-44, (1990)^[69].
5. MONTEIRO, H. S., SAID J.C., MENDES, J. F., SRIVASTAVA, R., "An apparatus for fabrication of optical waveguides by electromigration", Rev. Sci. Instrum., 68 (7), July, (1997).

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1-TSUJIMOTO, Y., SERIZAWA, H., HATTORI, K., FUKAI, M., "Fabrication of low loss 3 dB coupler with multimode optical fibres", *Electr. Lett.*, 14, 5, 157-158, (1978).
- 2-TANAKA, T., SERIZAWA, H., TSUJIMOTO, Y., "Characteristics of directional couplers with lapped multimode fibers", *Appl. Opt.*, 19, 12, 2019-2024, (1980).
- 3-BERGH, R.A., KOTTLER, G., SHAW, H.J., "Single-mode optical directional coupler", *Electr. Lett.*, 16, 7, 260-261, (1980).
- 4-BERGH, R.A., LEFEVRE, H.C., SHAW, H.J., "Single mode fiber-optic polarizer", *Opt. Lett.*, 5, 479, (1980).
- 5-PARRIEAUX, O., BERNOUX, F., CHARTEER, G., "Wavelength selective distributed coupling between single mode optical fibers for multiplexing", *J. Optic. Commun.*, 2, 3, 105-109, (1981).
- 6-DIGONNET, M.F.J., SHAW, H.J., "Analysis of tunable single mode optical fiber coupler", *IEEE J.Quant. Electr.*, QE-18, 4, 746-754, (1982).
- 7-DIGONNET, M.F.J., SHAW, H.J., "Wavelength multiplexing in single mode fiber couplers", *Appl. Opt.*, 22, 3, 484-491, (1983).
- 8-BERGH, R.A., "All-fiber gyroscope with optical Kerr-effect compensation", Ph.D. Thesis, Stanford University, (1983).

- 9-NEWTON, S.A., BOWERS, J.E., KOTTLER, G., SHAW, H.J., "Single-mode fiber 1 x N directional couplers", *Opt. Lett.*, 8, 1, 60-62, (1983).
- 10-JACCARD, P., SCHEJA, B., BERTHOU, H., COCHET, F., PARRIEAUX, O., "A new technique for low cost all fiber device fabrication", *SPIE (Fiber Optic Couplers, Connectors and Splices Technology)*, 479, 16-22, (1984).
- 11-SYLVESTER, W.R., MC KEEMAN, J.C., "Automation of fiber optic polished coupler fabrication", *IEEE Proc.*, 715-717, (1990).
- 12-KENNETH, P.J., NEWTON, S.A., MOLSLESHI, B., NOSHE, T., CUTLER, C.C., GOODMAN, J.W., SHAW, H.J., "Optical fiber delay-line signal processing", *IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn.*, MTT-33, 3, 193-210, (1985).
- 13-WHALEN, M.S., WOOD, T.H., "Effectively non reciprocal evanescent-wave optical fibre directional coupler", *Electr. Lett.*, 21, 5, 175-176, (1985).
- 14-LEVY, R., "Directional Couplers", in: *Advances in Microwaves*, 1, 118-122, (1966), Academic Press, NY.
- 15-WOOD, T.H., WHALEN, M.S., "Demonstration of effectively non-reciprocal optical fiber directional couplers", *Conference on Optical Fiber Communications (Optical Society of America, Washington, DC)*, PDL14-1 - PD14-4.
- 16-BOUGHTON, R.J., FARHADIROUSHAN, M., KREIT, D., YOUNGQUIST, R.C., GILES, I.P., "Optical-fiber systems with non reciprocal couplers", *Opt. Lett.*, 12, 3, 205-207, (1987).

- 17-NODA, J. et al., "Polarization-maintaining fibers and their applications", J. Light Wave Tech., LT-4, 1071-1089, (1986).
- 18-KAWAKI, M., KAWASAKI, B.S., HILL, K.O., "Fabrication of single-polarization single-mode fiber couplers", Electr. Lett., 18, 22, 962-964, (1982).
- 19-VILLARRUEL, C.A., ABEBE, M., BURNS, W.K., "Polarization preserving single-mode fiber coupler", Electr. Lett., 19, 17-18, (1983).
- 20-NAYAR, B.K., SMITH, D.R., "Monomode polarization-maintaining fiber directional couplers", Opt. Lett., 8, 10, 543, (1983).
- 21-CARRARA, S.L.A., KIM, B.Y., SHAW, H.J., "Elasto-optic alignment of birefringent axes in polarization holding optical fiber", Opt. Lett., 11, 7, 470, (1986).
- 22-ABEBE, M., VILLARRUEL, C.A., BURNS, W.K., "Reproducible fabrication method for polarization preserving single-mode fiber couplers", J.Lightwave Tech., 6, 7, 1191-1197, (1988).
- 23-SORIN, W.V., JACKSON, K.P., SHAW, H.J., "Evanescent amplification in a single mode optical fibre", Electr. Lett., 19, 20, 820-821, (1983).
- 24-SORIN, W.V., YOUNGQUIST, R.C., CUTLER, C.C., SHAW, H.J., "Single-mode fiber saturable absorber", Opt. Lett., 9, 7, 315-317, (1984).
- 25-LAMOUREUX, B.F., ORSZAG, A.G., PRADE, B.S., VINET, J.Y., "Continuous laser amplification in a monomode fiber longitudinally pumped by evanescent field coupling", Opt. Lett., 8, 504-505, (1983).

- 26-MOLL, N., DOLFI, D., "Thermooptic coupler for multimode optical fibers", Appl. Opt., 24, 11, 1696-1703, (1985).
- 27-MARKATOS, S., AYRES, S., KREIT, D., KERR, A., YOUNGQUIST, R.C., GILES, I.P., "Optical fibre switch", SPIE (Fiber Optic Sensors II), 798, 376-380, (1987).
- 28-CHUBB, C.R., POWERS, J.K., BRYAN, D.A., "Fabrication grating couplers on optical fibers", Appl. Opt., 22, 24, 3913-3914, (1983).
- 29-RUSSEL, P. St. J., ULRICH, R., "Grating-fiber as a high-resolution spectrometer", Opt.Lett., 10, 6, 291-293, (1985).
- ~~30-WHALEN, M.S., WALKER, K.L., "In line optical fibre filter for wavelength multiplexing", Electr. Lett., 21, 17, 724-725, (1985).~~
- 31-SORIN, W.V., SHAW, H.J., "A single mode evanescent grating reflector", J. Lightwave Tech., LT-3, 5, (1985).
- 32-SORIN, W.V., NORABEDIAN, P., NEWTON, S.A., "Tunable single mode fiber reflective grating filter", J. Lightwave Tech., LT-5, 9, (1987).
- 33-RAGDALE, C.M., REID, D.C.J., BENNION, I., "Fiber grating devices", SPIE (Fiber Laser Sources and Amplifiers), 1171, 148-156, (1989).
- 34-PARK, C.A., ROWE, C.J., BUUS, J., REID, D.C.J., CARTER, A., BENNION, I., "Single mode behaviour of multimode 1.55 μm laser with a fibre grating external cavity", Electr. Lett., 22, 1132-1134, (1986).

- 35-ROWE, C.J., BENNION, I., REID, D.C.J., "High-reflectivity surface-relief gratings in single-mode optical fibers", IEE Proc., 134, Pt. J., 3, 197-200, (1987).
- 36-MILLAR, C.A., BRIERLY, M.C., MALLINSON, S.R., "Exposed-core single-mode-fiber channel-dropping filter using a high-index overlay waveguide", Opt. Lett., 12, 4, 284, (1987).
- 37-JOHNSTONE, W., THURSBY, G., MOODIE, D., VARSHNEY, R., CULSHAW, B., "Fibre optic wavelength channel selector with high resolution", Electr. Lett., 28, 14, (1992).
- 38-MOODIE, D.G., JOHNSTONE, W., "Wavelength tunability of components based on the evanescent coupling from a side-polished fiber to a high-index overlay waveguide", Opt. Lett., 18, 12, 1025, (1993).
- 39-DAVIES, D.E.N., KINGSLEY, S., "Method of phase modulating signals in optical fibres: amplification to optical-telemetry systems", Electr. Lett., 10, 21, (1974).
- 40-LAZNICKA, O.M.Jr., CHANG, C.L., "Processo e aparelho acusto óptico para modulação de fase". Patente no 8504092, Litton Systems Inc., EUA.
- 41-KANDALL, L., SORIN, W.V., SHAW, H.J., "Single-mode fiber evanescent polarizer/amplitude modulator using liquid crystals", Opt. Lett., 11, 3, 180-182, (1986).

- 42-PATTERSON, D.B., GODIL, A.A., KINO, G.S., KHURI-YAKUA, B.T.,
"Relaxable 400 MHz acousto-optic phase modulator for a single-mode optical
fiber", *Opt. Lett.*, 14, 4, 248-250, (1989).
- 43-PHILLIPS, M.W., FERGUNSON, A.I., KINO, G.S., PATTERSON, D.B., "Mode-
locked fiber laser with a fiber phase modulator", *Opt. Lett.*, 14, 13, 680-682,
(1989).
- 44-WILKINSON, M., HILL, J.R., CASSIDY, S.A., "Optical fibre modulator using
electro-optic polymer overlay", *Electr. Lett.*, 27, 11, 979, (1991).
- 45-JOHNSTONE, W., MURRAY, S., THURSBY, G., McDONACH, A., MOODIE, D.,
CULSHAW, B., "Fibre Optic modulator using active multimode waveguide
overlays", *Electr. Lett.*, 27, 11, 894, (1991).
- 46-FAWCETT G., JOHNSTONE W., ANDONOVIC I., BONE, D.J., HARVEY,
T.G., CARTER, N., RYAN T.G., "In- line fibre-optic intensity modulator using
electro-optic polymer", *Electr. Lett.*, 28, 11, 985, (1992).
- 47-CHEUNG, K., "Acousto optic tunable filters in narrow band WDM networks:
system issues on network applications", *IEEE Journal on Selected Areas in
Comm.*, 8, 6, 1015-1025, (1990).
- 48-DELEVAQUE, E., SIMONPIETRI, P., TAUFFUEB, E., DESFORGES, F.X.,
JEUNHOMME, L., "Direct mixing of pump and signal waves into erbium
doped silica fibers", *Conference on Optical Fiber Communications (Optical*

- Society of America, Washington, DC), San Jose, California, PD 19, 387-390, (1992).
- 49-EICKHOFF, W., "In-line fibre-optic polarizer", *Electr. Lett.*, 16, 20, 763-764, (1980).
- 50-GRUCHMAN, O., PETERMANN, K., STAUDIGEL, L., WEIDEL, E., "Fibre-optic polarizers with high extinction ratio", *ECOC 83 - 9th European Confer. on Opt. Comm.*, 305-308, (1983).
- 51-FETH, J.R., CHANG, C.L., STOKES, L.F., "A novel in-line single-mode fiber optic polarizer", *SPIE (Fiber Optic and Laser Sensors III)*, 566, 395-399, (1985).
- 52-KUTSAENKO, V., JOHNSTONE, W., LAVRETSKII, E., RICE, J., "Polarization Properties of a fiber to planar waveguide coupler incorporating a thin metal layer.", *IEEE Phot. Tech. Lett.*, 6, 11, 1344, (1994).
- 53-RAMASWAMY, R.V. and SRIVASTAVA, R., and CHLUDZINSKI, "Influence of Ag^+ - Na^+ ion-exchange equilibrium on the index profile of single-mode glass waveguides", in *Tech. Dig., Conference on Gradient-Index Optical Imaging Systems (Optical Society of America, Washington, DC) GRIN'87 (Reno, NV)*, Jan, 1987, pap.ThB4-1.
- 54-IZAWA T., NAKAGOME.H., "Optical waveguide formed by electrically induced migration of ions in glass plates", *Appl. Phys. Lett.*, 21, 12, 584, (1972).

- 55-CHARTIER G. H., JAUSSAUD, P., OLIVEIRA A. D., PARRIAUX, O., "Optical waveguides fabricated by electric-field controlled ion exchange in glass", *Electr. Lett.*, 14, 5, 132, (1978).
- 56-CHARTIER G. H., JAUSSAUD, P., OLIVEIRA A. D., PARRIAUX, O., "Fast fabrication method for thick and highly multimode optical waveguides", *Electr. Lett.*, 13, 25, 764, (1977).
- 57-CHARTIER G., COLLIER P., GUEZ A., JAUSSAUD, P., WON, Y., "Graded-index surface or buried waveguides by ion exchange in glass", *Appl. Opt.*, 19, 7, 1092, (1980).
- 58-EGUCHI, R. G., MAUNDERS, E. A., NIK, I. K., "Fabrication of low-loss waveguides in BK-7 by ion exchange", *Proc. Soc. Photo. Opt.*, 408, (1983).
- 59-HAUX, D., DI MAGGIO M., "Passive integrated components using buried waveguides in a specific glass", *Conference on Optical Fiber Communications (Optical Society of America, Washington, DC) OFC 88, THJ4*, (1988).
- 60-SEKI M., HASHIZUME, H., SUGAWARA, R., "Two-step purely thermal ion-exchange technique for single-mode waveguide devices in glass", *Electr. Lett.*, 24, 20, 1258, (1988).
- 61-DE BERNARDI, C., MALVICINO, C., MORASCA, S., MORRA, M., "Time and temperature influence on surface index change in K^+ - Na^+ ion exchanged optical waveguides", *J. Appl. Phys.*, 63, 1, 234, (1988).

- 62-DE BERNARDI C, MORASCA, S., SCARANO, D., "Low loss, high performance integrated optic wavelength demultiplexers fabricated by Na-K ion exchange on glass". SPIE, 1177, 155, (1989).
- 63-NAJAFI IRAJ, S., WU C., "Single - mode ion-exchanged glass waveguide power dividers", Conference on Optical Fiber Communications (Optical Society of America, Washington, DC) OFC 89, WM3, (1989).
- 64-JANET, L.J. , VOGEL, E.M., AITCHISON, J.S., "Ion-exchanged optical waveguides for all-optical switching", Appl.Opt., 29, 21, 3126, (1990).
- 65-TERVONEN, A., POYHONEN, P., HONKANEN, S. TAHKOKORPI, M., "A guided- wave Mach Zehnder interferometer structure for wavelength multiplexing", IEEE Phot. Tech. Lett., 3, 6, 516, (1991).
- 66-MONTEIRO, H.S., CELASCHI, S., JESUS, J.T., "Desenvolvimento de acopladores ópticos bidirecionais", Revista Telebrás, 28-35, (1987).
- 67-MONTEIRO, H.S., ARRADI, R., DINI, D.C., CONFORTI, E., "Polarization preserving coupler" (a ser submetido à Revista Brasileira de Física).
- 68-JESUS, J.T., MONTEIRO, H.S., DINI, D.C., "Fabricação e caracterização de multiplexadores em comprimentos de onda utilizando fibras ópticas", 7º Simp. Bras. Telecomunicações, 240-244, (1989).
- 69-MONTEIRO, H.S., ARRADI, R., CELASCHI, S., "Atenuador óptico variável", Rev. de Física Apl. e Instr., 5, 1, 34-44, (1990).

- 70-MONTEIRO, H.S., SAID, J.C., SRIVASTAVA, R., "Fiber-compatible buried Ag⁺-Na⁺ ion exchanged channel waveguides and 1 x N couplers in BK7 glass", (a ser submetido à revista internacional).
- 71-MARCUSE, D., "Theory of dielectric optical waveguides", Academic-Press, NY, (1974).
- 72-GLOGE, D., "Weakly guiding fibers", Appl. Opt., 10, 2252-2258, (1971).
- 73-SORIN, W.V., "Evanescent field devices using single-mode optical fibers", Internal Memorandum, Litton Systems, Jan., 1986.
- 74-DIGONNET, M.F.J., KIM, B.Y. in: DAKIN, J., CULSHAW, B., "Optical Fiber Sensors: Principles and Components", 7, 211, Artech House, Boston and Londres (1988).
- 75-VANCLOOSTER, R., PHARISEAU, P., "The coupling of two parallel dielectric fibers: I and II", Physica, 47, 485-513, (1970).
- 76-FINDAKLY, T., CHEN, C.L, "Optical directional couplers with variable spacing", Appl. Opt., 17, 5, 769-773, (1978).
- 77-BERGH, R.A., LEFEVRE, H.C., SHAW, H.J., "All single-mode fiber-optic gyroscope", Opt. Lett., 6, 4, 198-200, (1984).
- 78-KAMINOV, I.P., "Polarization in optical fibers", IEEE J. Quant. Electr., QE-17, 1, 15, (1981).

- 79-OKOSHI, T., "Heterodyne and coherent optical fiber communications: recent progress", IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn., MTT-30, 8, 1138, (1982).
- 80-DYOTT, R.B., BELLO, J., "Polarization-holding directional coupler made from elliptically cored fibre having a D section", Electr. Lett., 19, 601, (1983).
- 81-KAWACHI, M., KAWASAKI, B.S., HELL, K.O., "Fabrication of single-polarization single-mode fibre couplers", Electr. Lett., 18, 22, 962-964, (1982).
- 82-STOLEN, R.H., PAULA, R.P., "Single-mode fiber components", Proc. IEEE, 75, 11, 1498-1511, (1987).
- 83-RASLEIGH, S.C., STOLEN, R.H., "Preservation of polarization in single-mode fibers", Laser Focus, 19, 155-161, (1983).
- 84-RAMASURAMY, V., STANDLEY, R.D., SZE, D., FRENCH, W.G., "Polarization effects in short length, single-mode fibers", Bell Syst. Tech. J., 57, 3, 635-651, (1978).
- 85-OKAMOTO, K., SASAKI, Y., MUJA, T., KAWAKI, M., EDAHIRO, T., "Polarization characteristic in long length V.A.D. single mode fibers", Electr. Lett., 16, 768-769, (1980).
- 86-DINI, D. C., "Medida de birrefringência e sua diminuição por rotação da preforma em fibras ópticas monomodo". Tese de Mestrado, Dep. Microondas e Óptica, UNICAMP, 113, (1988).

- 87-TAKATO,N, JINGUJI K., YASU,M.,TOBA,H., KAWACHI, M., "Silica-based single - mode waveguides on silicon and their applications to guided - wave optical interferometers", J.Lightwave Tech., LT6, 1003-1010, (1988).
- 88-RAMASWAMY,R.V. and SRIVASTAVA, R., "Ion-exchanged glass waveguides : A review", IEEE J. Lightwave Tech., 6, 984-1002, (1988).
- 89-BOOTH,B.L., "Polymers for integrated optical waveguides", Polymers for Integrated Electronic and Photonic Applications, C.P.Wang Ed., NY Academic, 549-599, (1993).
- 90-ZHENGUANG,H., SRIVASTAVA,R., RAMASWAMY,R.V., "Loss-loss, small-mode passive waveguides and near adiabatic tapers in BK7 glass", IEEE J. Lightwave Tech., 7, 1590-1596, (1989).
- 91-CHENG,H.C. and RAMASWAMY, R.V., "Symmetrical directional coupler as a wavelength multiplexer-demultiplexer : Theory and experiment", IEEE J. Quant. Electr., 27, 567-574, (1991).
- 92-GROSSKOPF, K., FABICIUS, N., NOLTE,U., OESTE,H., WADA,H., SATO, S. and SEKI, M., "Integrated optical multiport splitters in glass for broadband communication networks", EFOC/LAN, Paris, IGI Proceedings, 148-152, (1992).
- 93-NISSIN, C., BEGUIN, A., JANSEN, R., LABORDE,P., "Optical Fiber Conference"(Optical Society of America, Washington, DC) OFC 89, 91, (1989).

- 94-POYHONEN, P., HONKANEN, S., TERVONEN, A., TAHKOKORPI, M. and ALBERT, J., "Planar 1/8 splitter in glass by photoresist masked silver film ion exchange", *Electr. Lett.*, 27, 1319-1320, (1991).
- 95-MILIOU, A. N. and SRIVASTAVA, R., "A 1,3 μm directional coupler polarization splitter by ion exchange", *IEEE J. Lightwave Tech.*, 11, 220-225, 1993.
- 96-AOKI, H., MURUYAMA F. and ASAHARA Y., "Glass waveguide laser", *IEEE Phot. Tech. Lett.*, 2, 459-460, (1990).
- 97-LAUERS C. R., HARRIS R. D., HAO, S., WILKINSON, J. S., O'DWYER, K.O., BURST, M. and SCHIFFRIN, D.J., J., *Electr.Chem.*, 387, 11-12, (1995).
- 98-COUTAZ J. L., JAUSSAUD P. C., "High index gradient in by ion exchange", *Appl. Opt.*, 21, 6, 1063, (1982).
- 99-FINDAKLY, T., "Glass waveguide by ion exchange : a review", *Optical Engineering*, 24, 2, 244, (1985).
- 100-MILIOU A., ZHENGUANG, H. C., CHENG, H. C., SRIVASTAVA, R., RAMASWAMY, R., V., "Fiber-compatible $\text{K}^+\text{-Na}^+$ ion-exchanged channel waveguides : fabrication and characterization", *IEEE J. Quant. Electr.*, 25, 8, (1989).
- 101-CHENG,H. C. and RAMASWAMY, R.V., "Simulation of tapered transitions in ion-exchanged channel waveguides", *Appl. Opt.*, 28, 1150-1156, (1990).

102-EGUCHI, R. G., MAUNDERS, E. A., NIK, I. K., "Fabrication of low-loss waveguides in BK-7 by ion exchange", Proc. SPIE , 408, 21-26, (1983).