

Carlos António Delgado Sousa Brites

Óptica Integrada
em
Interferometria Astronómica:
Combinadores Ópticos



Biblioteca
Faculdade de Ciências
Universidade do Porto

FC



Departamento de Física da
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Dezembro de 2006

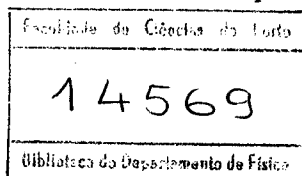
TA1660 BR1c 0 2006

Carlos António Delgado Sousa Brites

Óptica Integrada
em
Interferometria Astronómica:
Combinadores Ópticos



Dissertação Submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
para obtenção do grau de Mestre em Optoelectrónica e Lasers



Departamento de Física da
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Dezembro de 2006

João Delgado

Dissertação realizada sob a orientação do
Professor Associado António Manuel Pais Pereira Leite

À minha namorada e companheira
Lisa Andreia Almeida Inocência

Agradecimentos

Quero agradecer a todas as pessoas que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização desta tese de mestrado, especialmente ao meu orientador Professor Doutor António Pereira Leite pelas proveitosas discussões e sugestões que, sem dúvida, enriqueceram este trabalho. Quero também destacar o Professor Doutor Paulo Marques pelo auxílio nas actividades laboratoriais em geral, e na discussão sobre as bancadas de caracterização implementadas.

Ao Professor Doutor Paulo Garcia, agradecer pelas informações importantes do campo da Astronomia e pela interligação com o grupo de investigação francês, permitindo a discussão e clarificação de alguns aspectos.

Agradecer o apoio dos colegas, alunos de doutoramento, como o Paulo Moreira, na fabricação em sala-limpa, o Askari Ghasenpour na caracterização e fabricação em sala-limpa e o Daniel Alexandre pelas discussões nos programas de MatLab e na fabricação na máquina de escrita directa.

Ao INESC Porto, na pessoa do Professor Doutor José Luís Santos, agradeço a utilização de equipamentos e o suporte financeiro, que me permitiu desenvolver o trabalho de tese de forma sustentada e num regime de exclusividade que de outra forma não seria possível.

Por fim agradecer à minha família, nomeadamente ao meu irmão Ricardo pelo auxílio no programa LaTeX que usei para formatar a dissertação, e realçar o apoio incondicional da minha namorada nas horas de desânimo e nas horas de entusiasmo, quando a fustiguei com detalhes técnicos que, embora não compreendesse totalmente, ouviu pacientemente.

A todos, obrigado por tudo.

Índice

Índice	i
1 Enquadramento Geral de Interferometria Astronómica	3
1.1 Conceitos Básicos de Interferometria Astronómica	3
1.2 Contextualização do Conceito de Interferometria para Fins Astronómicos	7
1.3 Possibilidades de Combinação Usando Óptica Integrada . . .	11
1.4 Estado da Arte em Interferometria Astronómica	15
1.5 Conclusões	18
2 Optimização de Funções a Implementar em Combinadores	19
2.1 Análise Modal de Guia Planar e Guia em Canal	20
2.2 Parametrização de Guias em Canal	26
2.3 Funções em Óptica Integrada	32
2.4 Optimização de Funções usando BPM-CAD	42
2.5 Conclusões	57
3 Projecto de Combinadores em Óptica Integrada	59
3.1 Combinação Coaxial	59
3.1.1 Combinador de Dois Feixes	59
3.1.2 Combinador de Três Feixes	65
3.1.3 Combinadores de Mais de Três Feixes	72
3.2 Combinação Multiaxial	74
3.2.1 Combinador de Dois Feixes	76
3.2.2 Combinador de Três Feixes	79
3.2.3 Combinadores de mais de Três Feixes	84

3.3	Conclusões	86
4	Fabricação de Combinadores em Óptica Integrada	89
4.1	Tecnologias de Fabricação de Dispositivos em Óptica Integrada	89
4.1.1	Tecnologia Sol-Gel Híbrido	89
4.1.2	Alternativas à Tecnologia Sol-Gel Híbrido	91
4.2	Aspectos Práticos da Fabricação de Dispositivos em Óptica Integrada	93
4.3	Combinadores Coaxiais	97
4.4	Combinadores Multiaxiais	101
4.5	Conclusões	104
5	Caracterização de Combinadores em Óptica Integrada	107
5.1	Medições de Características de Combinadores	107
5.2	Bancadas de Caracterização Implementadas	110
5.3	Medições Efectuadas	114
5.4	Conclusões	122
6	Combinador Avançado em Óptica Integrada	125
6.1	Sistema de Metrologia e Sistema de Ciência	125
6.2	Projecto de Combinador Avançado de Dois Feixes	126
6.3	Função Dicróica	128
6.4	Conclusões	130
7	Conclusões e Trabalho Futuro	131
	Referências	133
	Anexos	
A	Cálculo Numérico da Eficiência de Acoplamento	A.1
B	Determinação Numérica de Regime Monomodo	B.1
C	Procedimentos de Microfabricação	C.1

Sumário

Esta dissertação apresenta o trabalho desenvolvido sobre o projecto e implementação de combinadores ópticos em óptica integrada com aplicações astronómicas.

São apresentados os fundamentos da técnica de obtenção de imagens por síntese se abertura e é explorado o conceito de combinador óptico monomodo, analisando os aspectos fundamentais desta técnica.

Identificam-se os esquemas de combinação em que é possível combinar feixes de telescópios e apresentam-se esquemas de princípio para combinação coaxial, multiaxial e matricial.

Com o objectivo de projectar combinadores ópticos, são parametrizadas as funções elementares básicas para a sua fabricação, como junções em Y, curvaturas em S, cruzamentos em X, entre outras.

São apresentados projectos de combinadores no esquema coaxial para dois, três e quatro feixes e no esquema multiaxial para dois e três feixes. Os combinadores são analisados em termos cromáticos e são definidas tolerâncias de fabricação.

São apresentados os aspectos mais relevantes da fabricação dos combinadores em tecnologia sol-gel híbrido, assim como resultados de caracterização desses dispositivos.

Finalmente é apresentado um projecto de combinador avançado, com integração de funções de ciência e metrologia num único "chip".

Os resultados obtidos são discutidos e apontadas linhas de trabalho futuro.

Abstract

This dissertation presents the work developed on the design and implementation of integrated optics beam combiners for astronomical applications.

The fundamental principles of the technique of imaging by aperture synthesis are presented, and the concept of monomode optical beam combiner is discussed through an analysis of the most relevant aspects of this technique.

The schemes useful for combination of telescope beams are identified, and general approaches (coaxial, multiaxial and matricial) are presented.

Considering the objective of optical combiner design, the basic elementary functions to be included in their fabrication are parameterized, such as Y junctions, S-bends, X-crossings, among others.

The designs of coaxial combiners for two, three and four beams, and of multiaxial combiners for two and three beams, are all presented. The combiners are analyzed in terms of chromatic performance, and fabrication tolerances are defined.

The most relevant aspects of device fabrication using hybrid sol-gel technology are presented, with some results of device characterization.

Finally, the general organization of an advanced combiner, which would integrate in a single chip the Science and Metrology functions is presented.

The results obtained are discussed and lines of future work are indicated.

Capítulo 1

Enquadramento Geral de Interferometria Astronómica

1.1 Conceitos Básicos de Interferometria Astronómica

O conceito de Interferometria Astronómica surgiu em França durante o século XIX[14]. Fizeau, em 1868, explicou como a interferência de luz proveniente de um objecto astronómico poderia ser utilizada para obter informação relevante, do ponto de vista astronómico, sobre esse objecto. Posteriormente, foi desenvolvido o formalismo matemático necessário à obtenção de informação astronómica, como o diâmetro de estrelas (efectuado por Michelson em 1890, com correlação de campos), lançando as bases para a interferometria astronómica, que utiliza correlação de intensidades.

Hoje em dia a Interferometria Astronómica, ou Interferometria de Linha de Base Longa, está relacionada directamente com a síntese de imagem obtida de uma matriz de telescópios. A técnica consiste em recolher porções da frente de onda proveniente de um objecto astronómico e reconstruir o objecto através de algumas operações matemáticas sobre as franjas obtidas pela interferência da radiação das frentes de onda recolhidas.

Os conceitos centrais de Interferometria Astronómica podem ser entendidos usando modelos de interferómetros simples, como o interferómetro de Young ou o interferómetro de Michelson.

No interferómetro de Young, uma frente de onda plana ilumina duas fendas separadas pela distância b , observando-se um padrão de franjas (ou interferograma) projectado num ecrã. Para cada ponto do ecrã existem duas ondas, provenientes das duas fendas, que se sobrepõem; se a diferença de caminho óptico (*OPD*- "*optical path difference*") entre as ondas que se sobrepõem é um múltiplo inteiro do comprimento de onda, então observa-se

nesse ponto do ecrã uma franja brilhante; se, pelo contrário, a diferença de caminhos ópticos é um múltiplo ímpar de meio comprimento de onda, então observa-se uma franja escura nesse ponto do ecrã. Estas propriedades podem ser sistematizadas pelas expressões 1.1 e 1.2 (para os máximos e para os mínimos de interferência, respectivamente), e são válidas para interferência de qualquer par de ondas:

$$OPD = m\lambda \quad (1.1)$$

$$OPD = (m + 1/2)\lambda \quad (1.2)$$

No interferómetro de Young, a diferença de caminho óptico é dada por $b \cdot \sin(\theta)$, sendo b a distância entre fendas e θ a distância angular relativamente ao centro do ecrã, medida a partir do ponto médio entre as fendas. O número de franjas por unidade de ângulo pode ser escrito na forma da equação 1.3, em que $\Delta\Theta$ é o número de franjas por unidade de ângulo, ou frequência angular do interferograma:

$$\Delta\Theta = \frac{\lambda}{b} \quad (1.3)$$

As conclusões retiradas para o interferómetro de Young são transpostas para o contexto de interferometria astronómica se as aberturas representarem telescópios, e a distância entre fendas a distância entre telescópios, ou linha de base (ver figura 1.1). Neste caso, a diferença de fase entre os feixes que atingem os telescópios, devido à geometria da captação de luz, é dada pela expressão 1.4, em que $\vec{B}$ e $\hat{s}$ estão representados na figura 1.1.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{B} \cdot \hat{s} \quad (1.4)$$

A resolução do sistema interferométrico óptico calcula-se a partir da separação angular entre fontes que provoca o desaparecimento do padrão de franjas, ou seja, $2b$. A resolução angular do interferómetro astronómico será dada pela expressão 1.5:

$$\Delta\Theta_{interferometro} = \frac{\lambda}{2b} \quad (1.5)$$

Se for utilizado um único telescópio circular de diâmetro D , então o limite de resolução (no modo não interferométrico) é o limite de Rayleigh, definido pela expressão 1.6:

$$\Delta\Theta_{telescopio} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (1.6)$$

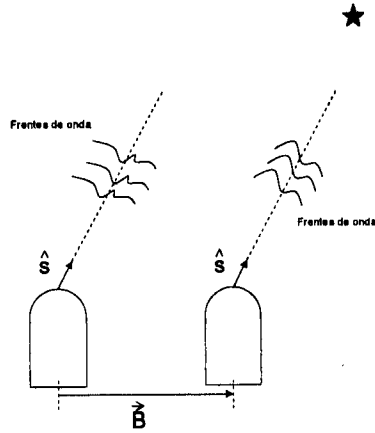


Figura 1.1: Esquema de princípio de interferometria de linha de base longa usando dois telescópios.

A limitação prática em termos de resolução para um telescópio de abertura circular é a coerência ao longo da abertura do telescópio. Uma vez ultrapassado o limite de coerência a imagem perde qualidade e surge o efeito de "speckle".

A resolução de um sistema interferométrico (1.5) é apenas limitada, em princípio, pela distância entre os telescópios. A utilização de uma matriz de telescópios pode ser efectivamente usada para recolher porções da frente de onda que são conduzidas e combinadas de forma a obter um padrão de interferência. A imagem será reconstruída a partir do interferograma gerado, caracterizado não só pela frequência espacial das franjas mas também pela visibilidade.

A visibilidade ou contraste das franjas é o que define a qualidade do interferograma gerado. Num caso geral é uma função complexa; no entanto, para avaliar um sistema interferométrico real, é comum utilizar-se a norma dessa grandeza, dada pela expressão 1.7, em que I_{max} é a intensidade máxima e I_{min} a intensidade mínima detectada no interferograma. Um interferograma de elevada qualidade terá $V = 1$, e um interferograma de baixa qualidade $V \sim 0$.

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (1.7)$$

De facto, é a visibilidade das franjas que permite reconstruir a imagem da fonte luminosa, utilizando o teorema de van Cittert-Zernike 1.8, apresentado em [19]:

$$\tilde{V}(u, v) = \iint B(\zeta, \eta) e^{-i2\pi(u\zeta + v\eta)} d\zeta d\eta \quad (1.8)$$

em que (ζ, η) são as coordenadas do plano tangente ao céu, (u, v) são as coordenadas de base no plano de Fourier, definidas em termos das coordenadas (x, y) do plano da imagem do objecto astronómico observado (imagem a reconstruir) por $u = bx/\lambda$ e $v = by/\lambda$. A reconstrução é implementada por manipulação da expressão 1.8 para recuperar $B(\zeta, \eta)$, conhecendo alguma informação sobre a função de visibilidade das franjas $\tilde{V}(u, v)$.

Na realidade, a reconstrução da distribuição da intensidade luminosa no plano do céu não é trivial: não cobrindo a totalidade do plano do céu originam-se convoluções no espaço de Fourier, quando é calculado $\tilde{V}(u, v)$. O arranjo espacial dos telescópios na matriz é optimizado de forma a obter a maior amostragem possível do plano de Fourier, tirando partido do movimento de translação terrestre. Por exemplo, o NPOI (Navy Prototype Optical Interferometer) apresenta uma configuração ajustável em três braços, cada qual com 250 metros de comprimento (ver figura 1.2). Podem ser definidas as posições de seis telescópios em pontos pré-definidos ao longo de cada braço, resultando em diferentes linhas de base e, consequentemente, diferentes resoluções.

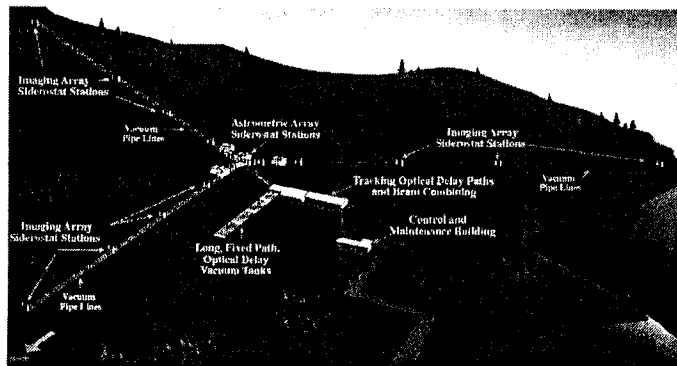


Figura 1.2: Esquema do interferómetro NPOI com detalhe das funções implementadas.

O processo de reconstrução passa por matrizes de mais de três telescópios e é realizado usando técnicas numéricas de "phase closure". Estas técnicas consistem em somar a fase medida em linhas fechadas de telescópios (triângulos é o mais usual), compensando efeitos de fase diferencial e recuperando a visibilidade com melhor relação sinal-ruído (*SNR-signal to noise ratio*).

Na prática, existem pacotes de software que reconstroem a distribuição

de intensidade luminosa a partir de um conjunto finito de pontos recolhidos, como o CLEAN e o MEM [19].

1.2 Contextualização do Conceito de Interferometria para Fins Astronómicos

Sendo possível reconstruir a imagem de um objecto astronómico a partir de interferogramas, é pertinente analisar os subsistemas necessários para obter esses interferogramas.

Tem particular interesse o estudo de um interferómetro astronómico monomodo, isto é, um sistema óptico que se caracteriza por todos os feixes serem transportados num modo óptico transversal fundamental. Esse sistema óptico pode ser esquematizado pela figura 1.3.

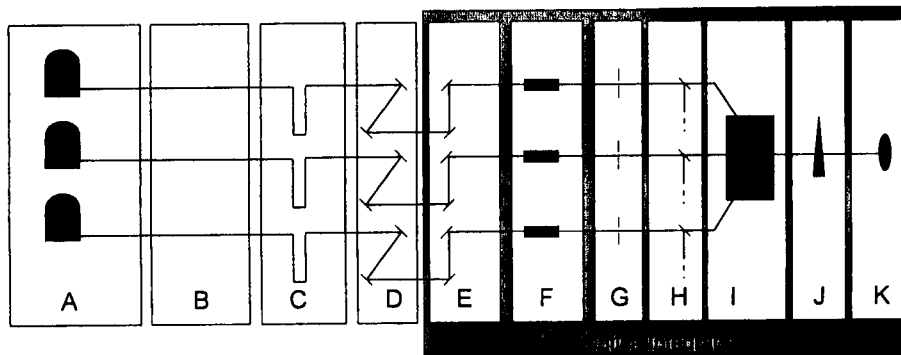


Figura 1.3: Esquema funcional de um interferómetro monomodo([12]).

Cada uma das etapas (A-K) corresponde a uma função específica:

A - Recolha de Luz - A utilização de telescópios é a forma mais usual de recolher luz para realizar interferometria astronómica. Para que um telescópio possa funcionar como o equivalente a uma das fendas da experiência de Young, é necessário que o diâmetro do telescópio não exceda o comprimento de coerência da frente de onda. O comprimento de coerência da frente de onda (r_0) corresponde à situação em que os campos em dois pontos distintos da frente de onda se tornam descorrelacionados. Este comprimento pode ser estimado através da teoria de Kolmogorov (regime turbulento) e corresponde a uma dependência com o comprimento de onda da forma $r_0 \propto \lambda^{6/5}$ [14]. Pode-se estimar o tempo de coerência τ_0 , que corresponde ao tempo que deve ser aberta a pupila do telescópio sem que

sejam introduzidos "defeitos" na imagem gerada pelo telescópio. Este tempo corresponde a $\tau_0 = \frac{r_0}{v_{vento}}$ [14].

Note-se que o comprimento de coerência pode ser alargado se forem utilizados mecanismos de compensação, como óptica adaptativa, referida adiante.

B - Transporte dos Feixes - Tradicionalmente, o transporte de feixes é assegurado por óptica convencional (espelhos e lentes) que levam os feixes até ao dispositivo combinador (passo I da figura 1.3). No entanto, o transporte utilizando fibras ópticas pode ser mais vantajoso em termos da qualidade da imagem final [6] uma vez que a fibra monomodo apenas aceita luz segundo alguns ângulos (frequências espaciais). Rejeitando algumas frequências espaciais melhora-se a visibilidade do interferograma obtido. No entanto, questões importantes são introduzidas pela utilização de fibras ópticas monomodo no transporte da radiação dos telescópios (dispersão, birrefringência [6]).

O transporte de feixe deve assegurar que não é alterada a fase, a polarização ou o campo de visão obtido em cada telescópio (por exemplo, espelhos de grandes dimensões evitam efeitos difractivos).

As vantagens da utilização de fibras ópticas em detrimento da óptica convencional estão no facto de as fibras serem muito compactas e reduzirem a necessidade de alinhamentos. Para além disso, o suporte de fibra óptica é bem conhecido e estudado noutros contextos, tais como em telecomunicações, e pode ser transposto conhecimento e tecnologia para estas novas aplicações. As principais desvantagens residem no comportamento pouco acromático no transporte do feixe (que se traduz em fenómenos dispersivos no transporte do feixe), baixa eficiência de acoplamento e pouco controle de polarização. As duas últimas limitações podem ser reduzidas ou completamente ultrapassadas utilizando acopladores à fibra servo-controlados (controlo dinâmico do acoplamento), e fibras que mantenham a polarização (*PMF - polarization maintaining fibers*). O problema da dispersão ainda continua em estudo e é actualmente o factor mais limitador para funcionamento em banda larga ($\Delta\lambda \sim 300nm$).

C - Controlo do caminho óptico (OPL) - O caminho óptico é uma variável central no estudo de um sistema interferométrico. É dado pela relação $OPL = \int_{P1}^{P2} n(\vec{r})ds$, em que n é o índice de refração do material onde ocorre propagação entre os pontos $P1$ e $P2$, e ds é a distância elementar percorrida pela luz. O controlo do caminho óptico para cada um

dos feixes a interferir é bastante importante, porque quando é usada luz de espectro largo as franjas de interferência só são visíveis para diferenças de caminhos ópticos da ordem de alguns comprimentos de onda. O número de franjas observadas num interferograma é da ordem de $\frac{\lambda_0}{\Delta\lambda}$, em que λ_0 é o comprimento de onda central e $\Delta\lambda$ é a largura de banda da luz analisada pelo sistema interferométrico.

É usual, em contexto astronómico, reduzir a observação a uma zona do espectro, o que limita a banda de comprimentos de onda em processamento. As zonas do espectro são identificadas com uma banda astronómica associada a uma letra. A tabela 1.1 resume as bandas astronómicas e os valores de comprimento de onda central e intervalo espectral total associados.

Banda	λ_0	$\Delta\lambda$
J	1.26	0.31
H	1.62	0.28
K _S	2.15	0.35
K	2.21	0.39
L	3.50	0.61
L'	3.78	0.59
M'	4.78	0.22
M	4.85	0.62

Tabela 1.1: Bandas de Observação Astronómica [5]

Para a banda J, por exemplo, será $\frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} \sim 4$ franjas. Para efectuar controlo do caminho óptico, são utilizados mecanismos de ajuste dinâmico do caminho óptico que são implementados, tipicamente, como uma compensação grosseira de caminho óptico até à ordem de alguns comprimentos de onda, seguida de um ajuste fino. Alguns resultados [14] mostram que são conseguidas diferenças de caminhos ópticos menores que 5 nm para comprimentos de onda na zona do visível.

D a G - Controlo da qualidade dos feixes - As etapas identificadas pelas letras D a G constituem o sistema de controlo da qualidade dos feixes que irão interferir. As etapas D e E constituem o ajuste fino de caminho óptico descrito na secção anterior, que é conseguido utilizando óptica adaptativa para corrigir as distorções da frente de onda relativamente à da onda plana incidente. A etapa F corresponde ao controlo de polarização. A polarização deve ser cuidadosamente controlada para garantir máxima visibilidade dos feixes, que é conseguida quando as polarizações dos feixes estão completamente alinhadas. A etapa G corresponde à filtragem espacial do

feixe. A filtragem pode ser realizada utilizando óptica convencional, através de lentes e um pequeno orifício ("pin-hole") devidamente colocado, que rejeita as frequências espaciais mais elevadas, e assim rejeita eventuais defeitos da imagem. Foi proposta e implementada a utilização de fibras monomodo para realizar esta função com as vantagens já enumeradas decorrentes da utilização de fibra, e ainda através da melhoria da filtragem espacial, que se traduzem na diminuição da influência da turbulência atmosférica (menor área do céu observada requer menor comprimento de coerência) e aumento da resolução angular do telescópio. A desvantagem da utilização de filtragem espacial é a redução do campo de visão do telescópio, que é compensada pelo salto de visibilidade (e consequentemente resolução) que provoca no interferograma.

H - Calibração fotométrica - A calibração fotométrica advém da necessidade de a intensidade dos feixes ser completamente equilibrada para obter máxima visibilidade das franjas (ver equação 1.7). Para realizar esta função é necessário, em princípio, medir a intensidade de cada feixe e actuar sobre a intensidade de cada um deles para obter máxima visibilidade, que corresponde, nas configurações mais simples, ao equilíbrio entre intensidades nos braços do interferómetro. A necessidade de equalização de intensidade nos braços é, em algumas configurações de dispositivos combinadores, substituída pela medição das intensidades de cada ramo e subsequente utilização de expressões matemáticas para correcção do interferograma em função dessas intensidades. Em combinação coaxial de dois feixes, por exemplo, o interferograma corrigido pode ser obtido a partir do interferograma de saída (I_0) e dos sinais fotométricos (Pa e Pb) pela expressão 1.9, em que α e β são obtidos a partir do quociente entre as potências no braço interferométrico e cada braço fotométrico [12]:

$$I_c = \frac{I_0 - \alpha Pa - \beta Pb}{2\sqrt{\alpha Pa \beta Pb}} \quad (1.9)$$

I - Combinação dos feixes - Para obter franjas de interferência é necessário justapor os feixes através de um dispositivo de combinação de feixe. Existem vários tipos de combinadores de feixe que podem ser classificados segundo vários parâmetros. A combinação de feixes em óptica integrada é o tema central desta dissertação. Para mais detalhes, consultar a secção 1.3.

J - Informação espectral - A informação obtida através do interferograma pode sofrer processamento espectral por introdução de elementos dispersivos, por exemplo. Com a informação espectral é possível determinar diâmetros estelares, temperaturas efectivas das estrelas, composição dos ambientes circumestelares, entre outras informações de utilidade astronómica. Este dispositivo pode desempenhar funções de controlo e ajuste do sistema interferométrico, pois permite determinar a franja central que corresponde a $OPD = 0$. Em algumas aplicações, o processamento da informação espectral pode não ser implementado, por não ter interesse do ponto de vista dos resultados obtidos.

K - Detecção - A detecção pode ser feita com câmaras CCD ("charge-coupled device") ou contadores de fótons para a zona do visível, ou com detectores de *InSb* ou outros semicondutores, numa matriz unidimensional quando as franjas se situam no infravermelho. Mais recentemente, têm sido utilizados dispositivos baseados em matrizes de detectores para realizar esta função.

A tecnologia de óptica integrada, no estado actual, permite propor alternativas viáveis para as etapas E a K, com vantagens de integração de dispositivos, estabilidade térmica e mecânica, assim como redução das necessidades de alinhamento. Nesta dissertação trata-se, em detalhe, a etapa I, de combinação de feixes usando óptica integrada.

1.3 Possibilidades de Combinação Usando Óptica Integrada

A combinação em óptica integrada pode ser feita em três esquemas diferentes: coaxial, multiaxial ou matricial. Para cada esquema de combinação podem ser implementadas soluções de combinação de feixes desde dois a dois (aos pares) até à combinação de todos os feixes em simultâneo (todos-em-um). Seguidamente descreve-se o esquema de princípio para a combinação todos-em-um nas configurações coaxial, multiaxial e matricial.

(i) - Combinação Coaxial

A combinação coaxial de feixes corresponde à utilização de um dispositivo em óptica integrada semelhante a um combinador de Mach-Zehnder.

Considere-se um combinador de dois feixes, que são guiados por guias monomodo até uma zona onde são combinados, num único guia monomodo.

Em todos os combinadores o percurso óptico é igual para todos os feixes que interferem. Um esquema de princípio deste esquema de combinação pode ser representado como na figura 1.4.

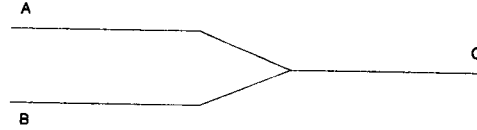


Figura 1.4: Esquema de princípio de um combinador coaxial

Se as ondas que entram nas portas A e B da figura 1.4 estão em fase (têm a mesma fase absoluta) deve verificar-se interferência construtiva, o que significa que deve haver sinal máximo na porta C. Pelo contrário, se as ondas que entram em A e B estão desfasadas de meio comprimento de onda (ou π , em fase), então ter-se-á interferência destrutiva, e o sinal na porta C é mínimo. Para qualquer desfasamento entre as entradas, a intensidade na saída C é, em função das intensidades nas entradas (I_A, I_B) e da diferença de fase ($\Delta\phi$), dada por 1.10:

$$I_C = I_A + I_B + 2\gamma\sqrt{I_A I_B} \cos(\Delta\phi) \quad (1.10)$$

γ é a função de coerência que depende da correlação entre as ondas que interferem, dada pela expressão 1.11, em que E_A e E_B são os campos eléctricos provenientes das aberturas A e B:

$$\gamma = \frac{\langle E_A | E_B \rangle}{\sqrt{\langle E_A | E_A \rangle \langle E_B | E_B \rangle}} \quad (1.11)$$

A intensidade em C depende, na aproximação das intensidades das ondas em A e B constantes e ondas planas monocromáticas, apenas da diferença de fase entre os braços (entradas). Assim, para construir o interferograma, faz-se variar a fase de um dos braços de forma a percorrer as diferenças de fase $\Delta\phi$ que provocam na saída franjas. Se as ondas não forem planas nem monocromáticas, o interferograma será modulado pela função de coerência das fontes (como discutido na etapa C da secção 1.2).

Quando é implementada a combinação coaxial para mais que dois feixes, existe a necessidade de efectuar modulação temporal para extrair sem ambiguidade o sinal correspondente a cada par de telescópios. Assim, para a combinação de dois feixes, é necessário um modulador à frequência f_0 ; para combinar três telescópios, são necessários dois moduladores; ou seja, para codificar n telescópios, são necessários $n - 1$ moduladores cuja combinação de frequências não seja redundante.

A não redundância de frequências de modulação é avaliada por tentativa e erro, usando os seguintes princípios:

1. A frequência máxima deve ter o valor mais baixo possível;
2. As diferenças entre as frequências devem ser não redundantes e apresentar a maior continuidade possível.

Para a combinação de três telescópios são necessários dois moduladores às frequências $f_{cod} = (f_0, 3f_0)$, o que produz as frequências de leitura $f_{lei} = (f_0, 2f_0, 3f_0)$. Esta distribuição de frequências pode ser esquematizada pelo diagrama de frequências apresentado na figura 1.5. Se forem combinados quatro telescópios serão necessários 3 moduladores às frequências:

$$f_{cod} = (f_0, 3f_0, 7f_0)$$

que produzem as frequências de leitura:

$$f_{lei} = (f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0, 6f_0, 7f_0).$$

Note-se que a frequência $5f_0$ não é usada na leitura (figura 1.5).

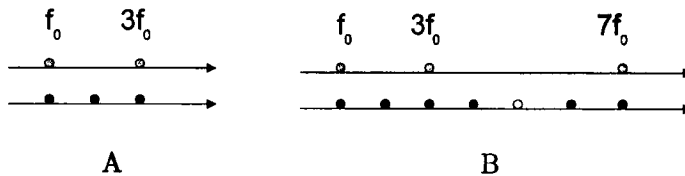


Figura 1.5: Diagramas de frequências de modulação e dos sinais de interferência. A-Dois moduladores B-Três moduladores

Com um número crescente de telescópios a combinar, as frequências de leitura mais altas crescem muito rapidamente, o que na prática dificulta ou invalida a combinação coaxial de um número de feixes muito acima de três. A solução passa pela utilização de esquemas de combinação multiaxial ou matricial que não necessitam de codificação das linhas de base para proceder à recuperação de sinal.

Mais pormenores sobre este esquema de combinação podem ser encontrados no capítulo 3.

(ii) - Combinação Multiaxial

A combinação multiaxial corresponde à utilização de um interferómetro semelhante ao interferómetro de Young.

Considere-se novamente um combinador de dois feixes. Os dois feixes são admitidos ao combinador através de guias monomodo, que são alargados adiabaticamente a fim de se obter uma frente de onda suficientemente extensa

para que os efeitos de difracção em espaço livre sejam pouco significativos. Os feixes interferem segundo um ângulo conhecido e pré-determinado pelo desenho do combinador, numa zona suficientemente larga para que possa ser aproximada a um guia planar. São formadas franjas estáticas no final da zona de propagação livre à frequência espacial determinada pelo ângulo de interferência. Um esquema de princípio deste esquema de combinação pode ser representado como na figura 1.6.

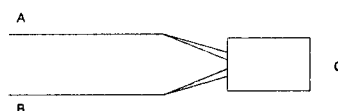


Figura 1.6: Esquema de princípio de um combinador multiaxial

A diferença de fase entre as portas A e B da figura 1.6 é traduzida por um deslocamento lateral das franjas. O interferograma gerado na porta C obedece novamente à expressão para a interferência de feixes 1.10, com $\Delta\phi = 2knx \sin(\delta/2) + \Delta\varphi$, em que $k = 2\pi/\lambda$, n é o índice efectivo da zona de propagação livre, x é a posição medida a partir do centro do interferograma, δ é o ângulo entre os braços no interferómetro e $\Delta\varphi$ é o desfasamento entre as entradas nas portas A e B. Novamente, o percurso para cada feixe deve ser equivalente.

Será teoricamente possível combinar qualquer número de feixes através deste esquema de combinação. Mas, na prática, isso torna-se complexo para combinação de um número elevado de feixes, particularmente se forem implementadas saídas fotométricas no combinador.

(iii) - Combinação Matricial

A combinação matricial, enquanto conceito, é mais complexa que a combinação coaxial ou multiaxial, e consiste em fazer interferir feixes com diferenças de fase definidas pela estrutura do combinador. Este esquema de combinação, à semelhança da combinação multiaxial, não necessita de codificação das linhas de base, e à semelhança da combinação coaxial pode ser obtido através de um desenho de princípio básico que é repetido várias vezes.

Na figura 1.7, as portas A e B recebem sinal dos telescópios e a porta C corresponde à combinação de A e B, amostrada em diferentes pontos (fase óptica diferente) simultaneamente. Existem técnicas de recuperação das fases relativas entre os telescópios, reportadas em [10].

Os benefícios em termos da relação sinal-ruído são significativos, pois

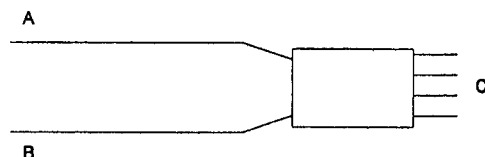


Figura 1.7: Esquema de princípio de combinador matricial de dois feixes.

não existe qualquer tipo de modulação e o sinal pode ser obtido em contínuo para cada saída. A implementação deste esquema de combinação pode ser conseguida fazendo combinação aos pares ou através de interferómetros multimodo *MMI* (*multimode interferometer*) adaptados para funcionamento em banda espectral larga (nenhum trabalho foi realizado nesta área, do conhecimento do autor).

A produção de dispositivos combinadores de feixe estava, até à pouco tempo, a avançar no sentido de se efectuar combinação de telescópios aos pares no esquema matricial, uma vez que a fase crítica reside nas etapas de projecto e fabricação. Os combinadores matriciais implementados têm dimensões da ordem das dezenas de milímetros e, portanto, requerem controlo das condições de fabricação com uma precisão muito acima das possibilidades actuais de qualquer grupo nacional a trabalhar em fabricação de dispositivos em óptica integrada.

Contudo a investigação de combinadores matriciais é um desafio em termos de projecto, na medida em que são necessárias funções de divisão e combinação de feixes em bandas espectrais largas, algumas desenvolvidas no capítulo 2.4.

O trabalho de referência respeitante à combinação matricial aos pares é [10], onde é apresentado o esquema de princípio de combinador de quatro feixes. O projecto apresentado é baseado numa função acromática de divisão 1:3 e em acopladores direccionais acromáticos. O desenho da máscara permite recuperar nas saídas (6×4 saídas) a combinação aos pares dos quatro feixes com saídas desfasadas de $\pi/2$. A recuperação da onda de interferência entre cada par de feixes é realizada através de uma técnica do tipo *ABCD*, uma vez que a amostragem da sinusóide de interferência é realizada em quatro pontos distanciados entre si de $\pi/2$ em fase.

1.4 Estado da Arte em Interferometria Astronómica

Historicamente, os primeiros combinadores foram implementados em fibra óptica, usando acopladores direccionais e tirando partido da elevada fil-

tragem espacial produzida por fibras monomodo. Posteriormente, e usando o conceito de combinação coaxial, foram implementados vários combinadores usando fibra óptica e óptica integrada.

As principais vantagens de usar óptica integrada para realizar a combinação de feixes residem na elevada estabilidade térmica e mecânica dos dispositivos, e na integração de várias funções (filtragem espacial, combinação de feixes, calibração fotométrica e controlo de polarização).

Existem, neste momento, vários projectos em curso usando imagem por síntese de aberturas. Com duas aberturas estão a operar, neste momento: o Sydney University Stellar Interferometer (SUSI), o GI2T do Observatoire de la Côte d'Azur, o Infrared Optical Telescope Array (IOTA).

Com três aberturas estão a operar o Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope (COAST), o Navy Prototype Optical Interferometer (NPOI).

Telescópios com mais de três aberturas, como o CHARA (Center for High Angular Resolution Astronomy) com 7 aberturas, ou o NPOI com 5 "siderostats" (siderostat é um tipo de telescópio que apenas recolhe luz e não possui um sistema óptico de formação de imagem). A colaboração europeia (ESO - European Southern Observatory) está neste momento a implementar formação de imagem por síntese de abertura para o VLTI (Very Large Telescope Interferometer).

A parte mais significativa da investigação em combinadores fabricados em óptica integrada tem sido desenvolvida pelo Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble (LAOG), e pelo Observatoire de Paris. Os investigadores franceses implementaram e testaram combinadores coaxiais de dois e três feixes em óptica integrada, fabricados usando tecnologia de permuta iónica e em tecnologia de sílica sobre silício, para a banda de observação astronómica H.

O primeiro combinador produzido e caracterizado em laboratório [3] e em contexto astronómico [8] foi um combinador de dois feixes com fotometria utilizando junções em Y e acopladores direccionais para a banda H.

Em laboratório, verificou-se que o combinador de dois feixes testado (ver figura 1.8) apresenta um contraste de 93% e uma estabilidade de 7% (valor rms) durante uma semana. O dispositivo combinador de feixes apresenta saída de 43% se fabricado em tecnologia de permuta iónica de iões prata, ou 27% se fabricado por permuta iónica de iões potássio. A principal fonte de perda são as junções em Y do dispositivo, com perda intrínseca de 50% da luz de entrada.

Um combinador em óptica integrada fabricado por tecnologia de permuta iónica de potássio, fabricado pelo LEMO (Laboratoire d'Electromagnetisme Microondes et Optoelectronique) e outro combinador fabricado usando tec-

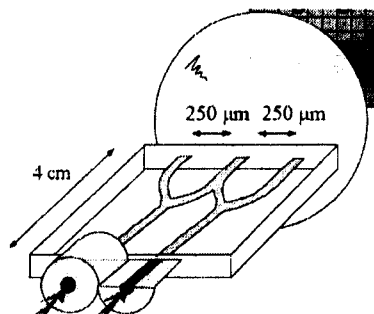


Figura 1.8: Esquema de combinador coaxial de dois feixes reportado em [3].

nologia de sílica sobre silício, fabricado e implementado com acoplador direcional pelo LETI (Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Information), foram testados em contexto astronómico no IOTA (Infrared-Optical Telescope Array) [8].

Foi possível substituir o combinador em óptica convencional pelos combinadores em óptica integrada em menos de duas horas, e foram observadas estrelas e comparados os diâmetros obtidos pelos combinadores, com elevada concordância de resultados (com 11.08 ± 0.57 mas de valor de referência, obteve-se 11.0 ± 0.5 mas com os combinadores em óptica integrada). O combinador foi ainda testado na banda de observação astronómica K. O contraste instrumental dos combinadores foi melhor que 60%, não sendo verificada diferença de desempenho entre os dois combinadores.

Os combinadores são testados e preparados para serem introduzidos em matrizes de telescópios, usando para o efeito "V-grooves" e fibras monomodo que mantêm o estado de polarização (PMF).

Foi fabricado, mais recentemente [2], um combinador de dois feixes para a banda astronómica K, que foi caracterizado em contextos laboratorial e astronómico. Os resultados aparecem na linha dos que foram reportados previamente para a banda H.

Em Portugal, estão a dar-se os primeiros passos em interferometria astronómica. Que seja do conhecimento do autor, apenas o INESC Porto (Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto) e o CAUP (Centro de Astrofísica da Universidade do Porto) trabalham sobre este assunto, seguindo alguns projectos europeus de estudo e implementação de combinadores em óptica integrada para realizar síntese de imagem de uma matriz de telescópios.

1.5 Conclusões

A Interferometria Astronómica é uma técnica que tem sido utilizada para reconstruir imagens com alta resolução angular a partir da combinação de feixes recolhidos por telescópios, utilizando a visibilidade complexa e o teorema de Van-Cittert Zernike.

O conceito pode ser extendido, em princípio, a qualquer número de feixes, em três esquemas de combinação: coaxial, multiaxial ou matricial. Os três esquemas têm diferentes graus de complexidade na implementação e poderão recuperar a visibilidade complexa com diferentes relações sinal-ruído (SNR). Cada esquema de combinação pode ainda operar sobre qualquer número de feixes, identificando-se normalmente dois extremos de combinação: combinação aos pares e combinação todos-em-um.

No esquema coaxial, a codificação de n linhas de base é feita externamente através de $n-1$ moduladores temporais, com frequências de codificação resultantes da combinação de cada par não redundantes. A frequência máxima de codificação para um número crescente de telescópios cresce muito rapidamente, o que acarreta maior erro na leitura dos sinais na saída.

A adopção de um esquema multiaxial ou matricial permite contornar esta questão, usando para o efeito geometrias mais complexas.

Para um combinador multiaxial, é possível determinar o ângulo de incidência para cada feixe de forma a obter um padrão na saída que permita recuperar a visibilidade complexa para cada par de feixes.

Mais recentemente, foi proposto um esquema matricial que consiste em fazer introduzir sinais num esquema semelhante ao coaxial mas sem realizar modulação de fase externa. São impostas relações de fase constantes (pré-determinadas pelas funções utilizadas) para recuperar um sinal de interferência com fases relativas entre os braços conhecidas.

A maior parte do trabalho desenvolvido nesta área provém do *LAOG*, que publicou resultados sobre fabricação, caracterização laboratorial e teste em contexto astronómico de dispositivos combinadores de dois feixes para as bandas H e K. A equipa de Grenoble conta com cerca de 20 anos de experiência na área e é, sem dúvida, aquela que lidera a investigação nesta área, tendo proposto novas soluções para combinação de telescópios, nomeadamente combinação matricial de quatro feixes aos pares, integração de dispositivos de ciência e de metrologia num único "chip" óptico de elevada complexidade, assim como trabalho em áreas paralelas de instrumentação como câmaras e detectores.

Capítulo 2

Optimização de Funções a Implementar em Combinadores

Existe um conjunto de funções básicas que serão repetidas no projecto de dispositivos combinadores de feixe. O objectivo deste capítulo é descrever e parametrizar essas funções básicas em óptica integrada.

A estrutura central em todos os dispositivos combinadores de feixe é o guia em canal, que realiza o transporte dos feixes até às funções implementadas. As saídas dos telescópios podem ser total ou parcialmente implementadas em fibra óptica monomodo que mantém a polarização da luz. Assim, é necessário determinar as dimensões do guia em canal para otimizar o acoplamento com fibra monomodo. Os guias em canal e restantes funções devem ainda garantir operação monomodo de todo o dispositivo.

As funções em óptica integrada discutidas são junções em Y, curvaturas em S, cruzamentos em X e alargamento de guias em canal (também designado pelo termo em inglês "taper").

Uma segunda fase de parametrização emergiu da possibilidade de desenvolver funções que ultrapassem as limitações de junções em Y. Isto implica que sejam analisados acopladores direccionais de várias geometrias e que o acoplamento seja aproximadamente acromático. As funções analisadas numericamente foram acopladores direccionais assimétricos.

Foi ainda analisado o alargamento da frente de onda em propagação livre e o acoplamento entre guias vizinhos, com vista à minimização do valor da constante de acoplamento, para posterior projecto de combinadores multiaxiais.

Este capítulo começa por parametrizar as funções a implementar, apre-

sentando alguns resultados teóricos da literatura sobre as mesmas. Seguidamente, é analisado o problema da optimização do acoplamento fibra-guia, analisando em detalhe a estrutura do guia em canal, a definição do regime monomodo e a descrição de aproximações utilizadas. São depois apresentados os fundamentos básicos do software de simulação numérica utilizado para a optimização de funções. Finalmente, são parametrizadas as funções a implementar.

2.1 Análise Modal de Guia Planar e Guia em Canal

A análise que se segue serve para contextualizar os guias em canal em termos teóricos e segue de perto a análise proposta em [22].

Guia de onda dieléctrico, ou simplesmente guia de onda, é o nome genérico que se dá a uma estrutura usada para confinar e guiar luz em dispositivos de óptica integrada.

A estrutura mais simples é denominada guia de onda dieléctrico planar uniforme, ou guia planar, e consiste numa estrutura que pode ser esquematizada pela figura 2.1, sendo invariante segundo y . A propagação é segundo $\hat{z}$. A estrutura é caracterizada pelos índices de refração da zona onde existe guiagem da luz ($n_{\text{núcleo}}$), e zonas adjacentes ($n_{\text{substrato}}$ e $n_{\text{superestrato}}$). Uma condição necessária para haver guiagem de um feixe é $n_{\text{núcleo}} > n_{\text{substrato}}, n_{\text{superestrato}}$.

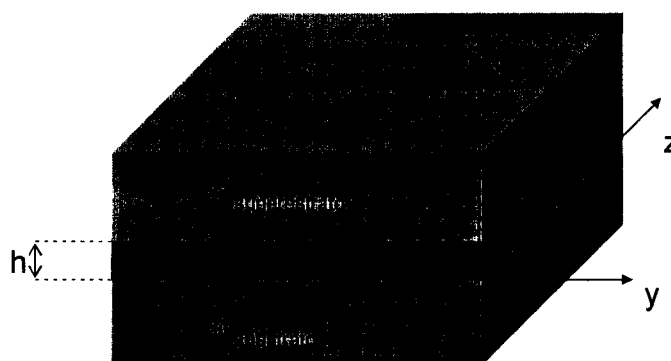


Figura 2.1: Esquema de guia planar.

Os índices de refração e a altura h do guia de onda determinam que campos electromagnéticos são permitidos na estrutura. Aplicando condições de fronteira em $x = 0$ e $x = h$ é possível determinar um conjunto de soluções

estacionárias para o campo electromagnético do guia planar, que se denominam por modos.

Em todo o espaço devem ser verificadas as relações de Maxwell para os campos eléctrico e magnético, expressas pelas relações 2.1 e 2.2:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

em que $\vec{\nabla} = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$, em coordenadas cartesianas, e $\vec{E}, \vec{D}, \vec{B}, \vec{H}$ representam os campos eléctrico, deslocamento eléctrico, magnético e indução magnética, respectivamente.

Cada um destes campos pode ser escrito na forma da equação 2.3 (exemplo para o campo eléctrico), em que $\vec{E}$ é a amplitude complexa, ω a frequência angular e o asterisco representa complexo conjugado:

$$\vec{E} = \vec{E} e^{i\omega t} + \vec{E}^* e^{-i\omega t} \quad (2.3)$$

Assumindo, em primeira aproximação, que o meio é linear e não tem perdas, então cada meio será caracterizado por um par de valores de permissividade eléctrica $\epsilon(\omega)$, e permeabilidade magnética μ , que verificam as relações constitutivas 2.4 e 2.5.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

A substituição das soluções complexas para os campos eléctrico e magnético nas relações de Maxwell permite reescrever as equações 2.1 e 2.2 na forma 2.6 e 2.7, respectivamente:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -i\omega\mu\vec{H} \quad (2.6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = i\omega\epsilon\vec{E} \quad (2.7)$$

As equações devem verificar-se em todos os pontos do espaço, com adequação dos valores das constantes ϵ e μ a cada situação. Na superfície de separação, deve verificar-se a continuidade das componentes perpendiculares (de $\vec{B}$ e $\vec{D}$) e tangentes (de $\vec{E}$ e $\vec{H}$) à interface de separação entre os dois

meios.

Os campos de indução magnética e de deslocamento eléctrico não são necessários à discussão, uma vez que os materiais que serão utilizados são assumidos dieléctricos isotrópicos lineares ideais e não-magnéticos ($\mu \simeq \mu_0$).

É comum separar as componentes longitudinais (segundo a direcção z indicada na figura 2.1) e transversais (plano (x, y) da figura 2.1) dos campos eléctrico e magnético. As equações 2.6 e 2.7 são reescritas para as componentes transversal e longitudinal na forma 2.8 a 2.11:

$$\vec{\nabla}_t \times \vec{E}_t = -i\omega\mu\vec{H}_z \quad (2.8)$$

$$\vec{\nabla}_t \times \vec{H}_t = i\omega\varepsilon\vec{E}_z \quad (2.9)$$

$$\vec{\nabla}_t \times \vec{E}_z + \hat{z} \times \frac{\partial \vec{E}_t}{\partial z} = -i\omega\mu\vec{H}_t \quad (2.10)$$

$$\vec{\nabla}_t \times \vec{H}_z + \hat{z} \times \frac{\partial \vec{H}_t}{\partial z} = i\omega\varepsilon\vec{E}_t \quad (2.11)$$

em que $\hat{z}$ é o vector unitário segundo a direcção do eixo dos z da figura 2.1.

A estratégia de determinação do perfil transversal do campo eléctrico consiste em encontrar soluções para as equações 2.8 e 2.9 que sejam invariantes ao longo da direcção z .

Até este ponto a análise é completamente geral. Segue-se uma análise para um guia planar e para um guia de onda em canal.

(i)-Guia Planar

Para um guia de onda planar podem ser consideradas duas polarizações dos campos na entrada: campo eléctrico transversal, ou TE, se $\vec{E}_z = \vec{0}$, e consequentemente $\vec{H}_y = \vec{0}$; campo magnético transversal, ou TM, se $\vec{H}_z = \vec{0}$ e, consequentemente, $\vec{E}_y = \vec{H}_x = \vec{0}$.

Encontrar soluções das equações 2.8 e 2.9 para um guia planar com campos relevantes apenas na zona do núcleo corresponde a determinar os modos guiados deste guia.

Assume-se que existe uma solução dada pelas expressões 2.12 e 2.13, em que ν é um índice que identifica o modo e β_ν é a constante de propagação associada ao modo ν :

$$\vec{E}_\nu(x, y, z) = \vec{E}_\nu(x, y)e^{-i\beta_\nu z} \quad (2.12)$$

$$\vec{H}_\nu(x, y, z) = \vec{H}_\nu(x, y)e^{-i\beta_\nu z} \quad (2.13)$$

A substitui  o destas solu  es nas equa  es de Maxwell produz as equa  es diferenciais 2.14.

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}_t \times \vec{E}_{t\nu} &= -i\omega\mu\vec{H}_{z\nu} & \vec{\nabla}_t \times \vec{E}_{z\nu} &= -i\omega\mu\vec{H}_{t\nu} \\ \vec{\nabla}_t \times \vec{H}_{t\nu} &= -i\omega\varepsilon\vec{E}_{z\nu} & \vec{\nabla}_t \times \vec{H}_{z\nu} &= -i\omega\varepsilon\vec{E}_{t\nu} \end{aligned} \quad (2.14)$$

No caso de um guia planar a distribui  o de  ndice ocorre apenas segundo a direc  o do eixo x , isto  , $n(x)$ (de acordo com a figura 2.1), o que simplifica as equa  es diferenciais 2.14 ($\partial/\partial y = 0$). As solu  es do campo electromagnético invariantes ao longo do guia são agrupadas em modos TE, se $\vec{E}_z = 0$, e modos TM, se $\vec{H}_z = 0$.

Para modos TE, impondo $\vec{H}_y = \vec{0}$, obt m-se o resultado da equa  o 2.15, e $\vec{E}_z = \vec{E}_x = \vec{0}$:

$$\beta\vec{E}_y = -\omega\mu\vec{H}_x \quad (2.15)$$

  possível obter as igualdades 2.16 e 2.17:

$$\partial\vec{E}_y/\partial x = -\omega\mu\vec{H}_z \quad (2.16)$$

$$\partial\vec{H}_z/\partial x + j\beta\vec{H}_x = -j\omega\varepsilon\vec{E}_y \quad (2.17)$$

Combinando as equa  es 2.15, 2.16 e 2.17, obtemos a equa  o de onda 2.18, em que $k = \omega/c = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$.

$$\partial^2\vec{E}_y/\partial x^2 = (\beta^2 - n^2k^2)\vec{E}_y \quad (2.18)$$

O mesmo cálculo aplicado aos modos TM permite obter a equa  o de onda 2.19:

$$n^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{n^2} \partial\vec{H}_y/\partial x \right) = (\beta^2 - n^2k^2)\vec{H}_y \quad (2.19)$$

Para modos TE, resulta a soluço 2.20, em que $\tan(\phi_s) = \gamma_s/k_f$ e $\tan(\phi_c) = \gamma_c/k_f$:

$$\begin{aligned} \vec{E}_y &= \vec{E}_c e^{-\gamma_c(x-h)} & \text{para } h < x & \quad (\text{superestrato}) \\ \vec{E}_y &= \vec{E}_f \cos(k_f x - \phi_s) & \text{para } 0 < x < h & \quad (\text{nucleo}) \\ \vec{E}_y &= \vec{E}_s e^{-\gamma_s(x)} & \text{para } x < 0 & \quad (\text{substrato}) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Aplicando condições fronteira, obtém-se a relação de dispersão 2.21:

$$k_f h - \phi_s - \phi_c = \nu\pi \quad (2.21)$$

Esta relação pode ser reescrita em termos de parâmetros normalizados. Define-se o parâmetro V , ou frequência normalizada, pela relação 2.22; o índice normalizado b , pela relação 2.23; e a assimetria, pela expressão 2.24:

$$V = kh\sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (2.22)$$

$$b = \frac{n_{eff}^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (2.23)$$

$$a = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (2.24)$$

Em termos dos parâmetros normalizados, a relação de dispersão 2.21 para modos TE é reescrita na forma:

$$V\sqrt{1-b} = \nu\pi + \arctan\left(\sqrt{\frac{b}{1-b}}\right) + \arctan\left(\sqrt{\frac{b+a}{1-b}}\right) \quad (2.25)$$

A equação 2.25 produz o gráfico da figura 2.2, para os primeiros três modos, tomando a como parâmetro.

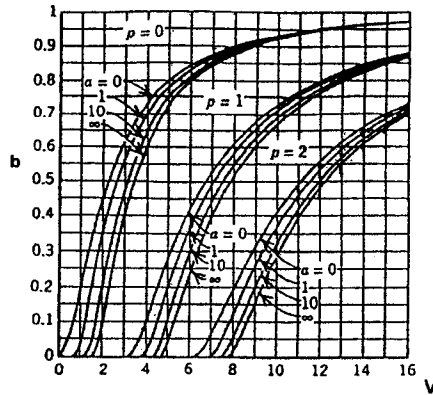


Figura 2.2: Diagrama (V, b) para um guia planar. Os índices p correspondem à numeração de modo ν [15]

Uma relação de dispersão semelhante pode ser obtida para modos TM de um guia planar :

$$V\sqrt{q}\frac{n_g}{n_s}\sqrt{1-b} = \nu\pi + \arctan\left(\sqrt{\frac{b}{1-b}}\right) + \arctan\left(\sqrt{\frac{b+a(1-bC)}{1-b}}\right) \quad (2.26)$$

$$C = \left[1 - \left(\frac{n_{substrato}}{n_{nucleo}}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{n_{superestrato}}{n_{nucleo}}\right)^2\right] \quad (2.27)$$

$$b = \left(\frac{n_{eff}^2 - n_{substrato}^2}{n_{nucleo}^2 - n_{substrato}^2}\right) \left(\frac{n_{nucleo}}{q \times n_{substrato}}\right)^2 \quad (2.28)$$

$$q = \left(\frac{n_{eff}}{n_{nucleo}}\right)^2 + \left(\frac{n_{eff}}{n_{substrato}}\right)^2 - 1 \quad (2.29)$$

$$a = \left(\frac{n_{nucleo}}{n_{superestrato}}\right)^4 \left(\frac{n_{substrato}^2 - n_{superestrato}^2}{n_{nucleo}^2 - n_{substrato}^2}\right) \quad (2.30)$$

(ii)-Guia em Canal

Podem ser fabricados vários tipos de guias de onda dieléctricos em canal, mas nesta dissertação existe particular interesse em caracterizar um guia de onda com a geometria apresentada na figura 2.3. A análise exacta desta estrutura não produz resultados analíticos para os modos guiados. No entanto, é possível obter resultados aproximados usando vários métodos.

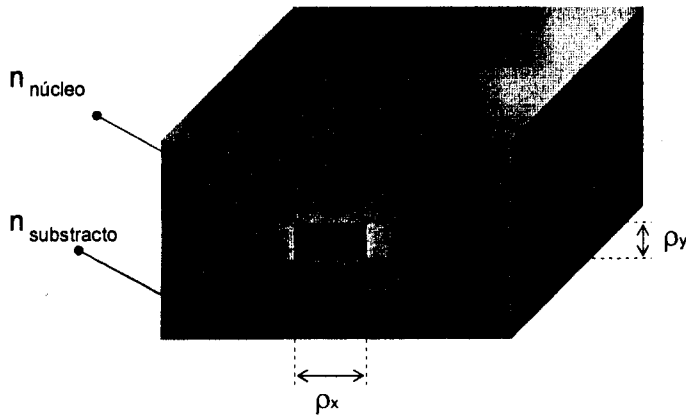


Figura 2.3: Esquema de guia em canal.

A análise mais simples recorre à aplicação do método dos índices efectivos para determinar as soluções para os modos guiados da estrutura da figura 2.3. Os fundamentos do método podem ser encontrados em [11].

O método é utilizado para reduzir uma estrutura a três dimensões a um perfil de índice equivalente a duas dimensões, ou mesmo a uma dimensão. Na prática, o método consiste em realizar cortes da estrutura de um guia a três dimensões (segundo a direcção x , por exemplo) e realizar o cálculo do índice efectivo usando as relações de dispersão 2.25 e 2.26 (ou, em alternativa, a curva de dispersão $V - b$), considerando para o efeito o guia planar observado segundo o corte efectuado (depende do perfil de índice existente e das dimensões físicas do guia planar equivalente). Usando as definições dos parâmetros normalizados a , b e V é possível determinar um índice efectivo, correspondente a $n_{eff} = \beta/k$. A técnica pode ser repetida para o corte segundo a outra direcção ortogonal à direcção de propagação, usando agora o índice calculado no primeiro passo como novo índice do guia planar encontrado segundo esta direcção. A análise permite reduzir perfis de índice, a duas ou três dimensões, a um perfil unidimensional, com bom ajuste às soluções consideradas exactas, obtidas pelo método de elementos finitos [11].

2.2 Parametrização de Guias em Canal

As características dos guias em canal a fabricar devem garantir simultaneamente funcionamento monomodo e maximização de acoplamento com fibra óptica monomodo convencional. As parametrizações são realizadas seguindo a análise proposta em [11].

i- Acoplamento a Fibra Óptica Monomodo

As características das fibras são os parâmetros fixos do problema, uma vez que só estão disponíveis para teste do dispositivo fibras monomodo de produção industrial, como por exemplo, as fibras fabricadas pela Corning Glass. Tem particular interesse a fibra *SMF28*, caracterizada pelo parâmetro MDF ("modal field diameter") $MFD = 9.2 \pm 0.4 \mu m$ para $\lambda = 1310 nm$ e $MFD = 10.4 \pm 0.5 \mu m$ para $\lambda = 1550 nm$. O raio do núcleo da fibra vale $r_{fibra} = 4.1 \mu m$.

O parâmetro MFD corresponde ao diâmetro modal do campo, que é definido por Petermann em [16], na forma 2.31, em que $q = (1/\lambda) \sin(\theta)$, sendo θ o ângulo no "far-field" e F o campo eléctrico também no "far-field". Esta definição está de acordo com a norma internacional G652 da

CCITT("Comité Consultatif International Téléphonique et Telegraphique"):

$$MFD = \frac{2}{\pi} \left[\frac{2 \int_0^\infty q^3 F^2(q) dq}{\int_0^\infty q F^2(q) dq} \right]^{-1/2} \quad (2.31)$$

Nesta análise serão desprezados efeitos de reflexão do campo na interface fibra-guia, assim como efeitos de absorção do material, e é feita uma aproximação escalar ao campo eléctrico em cada um dos meios (fibra e guia), o que será válido tendo em conta os baixos contrastes de índice em cada meio. Estas aproximações conduzem à expressão 2.32 para o acoplamento ao modo fundamental da fibra.

$$\eta = \frac{P_{guia}}{P_{fibra}} = \frac{(\int_{A_\infty} e_{guia} e_{fibra} dA)^2}{\int_{A_\infty} e_{guia}^2 dA \int_{A_\infty} e_{fibra}^2 dA} \quad (2.32)$$

em que e_{guia} e e_{fibra} representam a solução escalar para o modo fundamental do campo eléctrico no guia e na fibra, respectivamente. Os integrais são calculados em toda a área das secções transversais. Esta expressão pode ser entendida como o quadrado da projecção do campo da fibra no campo do guia (ou vice-versa), normalizado. O coeficiente η é chamada eficiência de acoplamento e varia entre zero e um. A perda em dB é calculada a partir da eficiência de acoplamento pela expressão 2.33:

$$Perda(dB) = -10 \log_{10} \left(\frac{P_{guia}}{P_{fibra}} \right) \quad (2.33)$$

Se o campo para o guia quadrado for escrito em aproximação gaussiana na forma 2.34, em que (x_g, y_g) são as coordenadas do topo do guia quadrado que está em contacto com a fibra, e e_{0guia} for a amplitude do campo da fibra, então w_g é dado pela relação $w_g = S \times \rho/2$, com S determinado numericamente através da expressão 2.35, em que V é a frequência normalizada dada por 2.22 [11]. Na definição de w_g , $\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y}$, onde ρ_x e ρ_y são as dimensões geométricas do guia em canal.

$$e_{guia} = e_{0guia} e^{-\frac{x_g^2 + y_g^2}{2w_g^2}} \quad (2.34)$$

$$\frac{1}{S} = \frac{2V^2}{\pi} e^{-\frac{1}{S^2}} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{S} \right) \quad (2.35)$$

Se o campo da fibra, em aproximação gaussiana, tem a expressão 2.36, em que $(x_f, y_f) = (x_g, y_g)$ são as coordenadas do topo do guia quadrado que está em contacto com a fibra, e e_{0fibra} é a amplitude do campo da fibra, o

parâmetro w_f é dado pela relação 2.37[16].

$$e_{fibra} = e_{0fibra} e^{-\frac{x_f^2 + y_f^2}{2w_f^2}} \quad (2.36)$$

$$w_f = \frac{MFD}{2\sqrt{2}} \quad (2.37)$$

Foi produzido um código em MatLab para simular o problema de acoplamento entre fibra monomodo e guia quadrado, que se encontra no Anexo A.

O efeito da variação do lado do guia quadrado na eficiência de acoplamento (2.32) e os efeitos de desalinhamento lateral e angular entre a fibra e o guia em canal foram estimados. O desalinhamento angular é simulado introduzindo o factor $e^{-jk \sin \theta x}$, em que θ é o desalinhamento angular, figura 2.4. Os resultados obtidos estão representados nas figuras 2.5, 2.6 e 2.7.

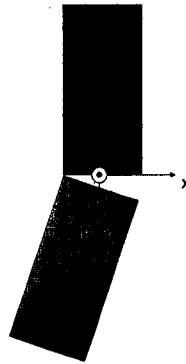


Figura 2.4: Desalinhamento angular da fibra em relação ao guia quadrado.

A figura 2.5 foi obtida variando o lado $\rho = \rho_x = \rho_y$ do guia quadrado, com índice $n_{nucleo} = 1.5096$ para o índice de refração da região do guia e sendo tomado um índice para as zonas externas $n_{substrato} = 1.4998$ mais baixo [17]. Os resultados numéricos mostram que o lado do guia que maximiza o acoplamento é $\rho = 3.20\mu m$, e produz uma eficiência de acoplamento $\eta = 0.98$. A perda está abaixo de $1dB$ para lados do guia entre 3 e $5\mu m$.

A figura 2.6 foi obtida para o lado do guia quadrado ótimo da simulação anterior, variando a posição relativa entre fibra e guia. Os resultados numéricos mostram que a posição da fibra que maximiza o acoplamento é $x_0 = 0$, e produz uma eficiência de acoplamento $\eta = 0.98$, como seria de esperar.

A figura 2.7 foi obtida para o lado do guia quadrado e posição relativa

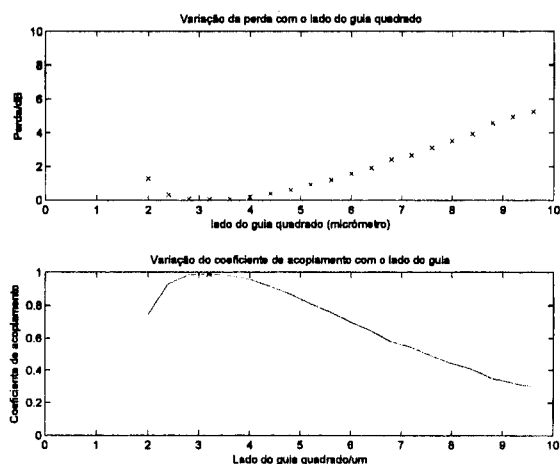


Figura 2.5: Resultados de simulação numérica da variação do lado de guia quadrado

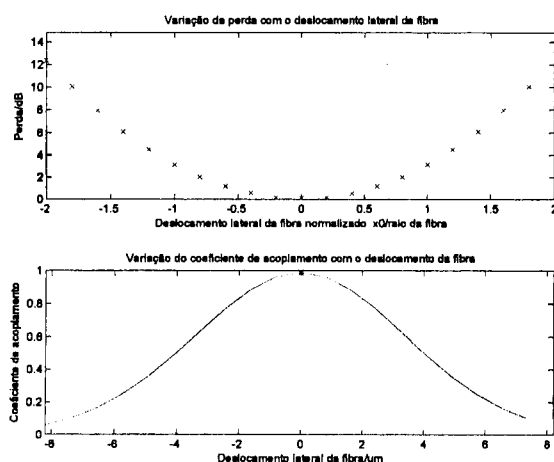


Figura 2.6: Resultados de simulação numérica da variação da posição da fibra em relação ao guia quadrado

entre fibra e guia óptimos. Variando o ângulo θ entre o guia e a fibra, confirma-se que resulta uma eficiência de acoplamento máxima de $\eta = 0.98$, se $\theta = 0^\circ$. A perda está abaixo de $1dB$ para desvios angulares até 4° em torno da posição de máximo.

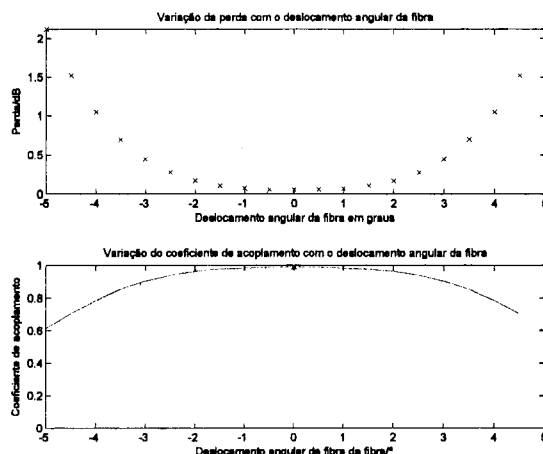


Figura 2.7: Resultados de simulação numérica de variação do ângulo entre a fibra e o guia quadrado.

ii- Regime Monomodo do Guia em Canal de Secção Quadrada

O problema de garantir que apenas o modo fundamental é propagado é bastante conhecido e estudado.

É possível caracterizar a estrutura do guia que está no limiar de operação monomodo através da frequência normalizada 2.22. Usando o método de elementos finitos (considerado exacto para este fim) é possível estabelecer o parâmetro $V=2.1364$ como o valor máximo em que o segundo modo não é propagado pela estrutura [11].

Para exprimir o lado do guia em função da abertura numérica NA ($NA = \sqrt{n_{nucleo}^2 - n_{bainha}^2}$), usa-se a equação 2.38 [11].

$$\rho = \frac{V_{corte}\lambda}{2\pi NA} \quad (2.38)$$

Foram produzidos os gráficos das figuras 2.8 e 2.9, recorrendo a um código em MatLab que se encontra em Anexo B.

Os gráficos, apresentados com os parâmetros de fabricação em tecnologia sol-gel (secção 4.1.1) permitem verificar que é possível produzir guias de onda em canal a operar em regime monomodo a 1302 nm (e 1553 nm) para zircónio a 30%. Para zircónio a 40% essa operação é apenas conseguida a 1553 nm. Note-se que é possível construir guias com dimensões de 3 a $4\mu m$ que estão dentro da resolução de fabricação e que garantem regime monomodo do dispositivo. Os dispositivos serão projectados com guias quadrados de $4\mu m$ de lado, que embora não sejam monomodo apresentam fraca guiagem para

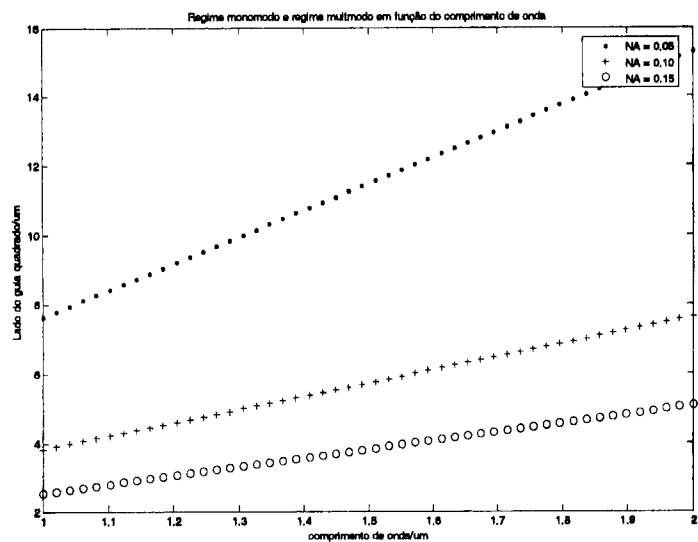


Figura 2.8: Resultados de simulação numérica de fronteira entre regime monomodo e multimodo, em função do lado, de guia em canal quadrado $MFD=9.2\ \mu m$; $n_{nucleo}=1.5096$; $n_{substrato}=n_{superestrato}=1.4998$.

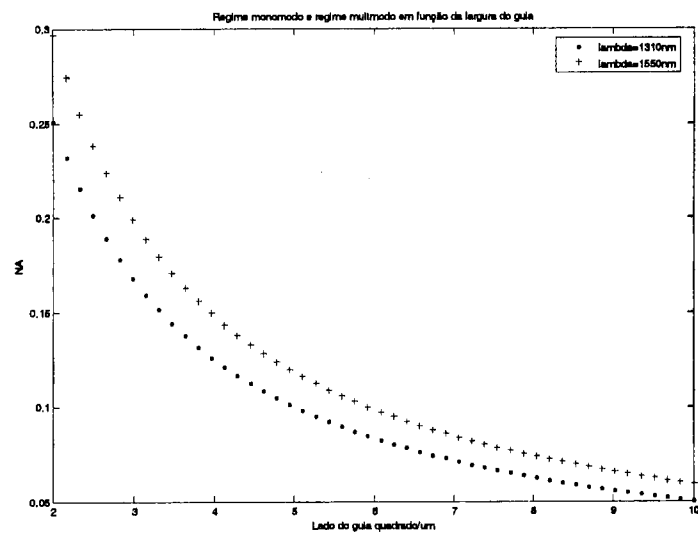


Figura 2.9: Resultados da simulação numérica da fronteira entre regimes monomodo e multimodo, em função da abertura numérica, de guia em canal quadrado. $MFD=9.2\ \mu m$;

o segundo modo guiado, que será facilmente radiado pela estrutura dos combinadores a fabricar.

2.3 Funções em Óptica Integrada

As funções com interesse de implementação em óptica integrada são: guias de onda em canal de largura variável, curvaturas em S, cruzamentos de guias em X, junções ou divisões em Y, acopladores direccionais assimétricos. Sempre que for conveniente utilizar-se-ão os valores de fabricação em tecnologia sol-gel, apresentados na secção 4.1.1: $n_{20\%Zr} = 1.4998$; $n_{30\%Zr} = 1.5096$; $n_{eff} = 1.5165$ (valores para $\lambda = 1.302nm$).

i-Guia em canal de largura variável, ou "taper"

O guia de onda em canal de largura variável, ou "taper", caracteriza-se pelas larguras inicial e final e pela forma como se efectua a transição entre estas [11]. Nenhuma configuração de transição pode tornar as perdas nesta estrutura totalmente desprezáveis, mas existem algumas que tornam as perdas aceitáveis. Foram testadas várias configurações e estabelecido um ponto óptimo para o seu funcionamento. Para o estudo desta estrutura existe interesse em explorar o comportamento de configurações com possibilidade de serem fabricadas, e por isso foram seleccionados o "taper" parabólico e o "taper" linear.

O estudo de guias de largura variável é feito com detalhe em [11] e [13]; esta análise segue de perto estas referências.

Define-se regime adiabático de funcionamento de um "taper" como as propriedades geométricas do "taper" que permitem guiar luz (com determinado comprimento de onda) sem que uma quantidade significativa de potência seja acoplada a outros modos que não o modo fundamental do guia de saída. Existe interesse em garantir que todos os "taper" a produzir estejam nestas condições, uma vez que todo o dispositivo combinador deverá ter comportamento monomodo.

Para definir em que condições um "taper" é adiabático, é proposto em [11] que a sua geometria deve obedecer a um critério de perda que estabelece que não devem ser usadas escalas de alargamento do "taper" que excedam o comprimento de acoplamento com o campo de radiação (contínuo de modos de radiação). Este argumento permite estabelecer, para um guia rectangular, que a divergência do "taper" deve ser limitada pela expressão 2.39:

$$\theta = \frac{\sqrt{2\Delta} W^2}{4\pi V} \quad (2.39)$$

em que (parâmetros indicados na figura 2.3):

$$\Delta \simeq \frac{n_{nucleo} - n_{substrato}}{n_{nucleo}}$$

$$W = k\rho\sqrt{n_{eff}^2 - n_{substrato}^2},$$

$$V = k\rho\sqrt{n_{nucleo}^2 - n_{substrato}^2},$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda},$$

$$\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y},$$

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k}.$$

λ é o comprimento de onda, e ρ_x, ρ_y são as dimensões da secção transversal do "taper", n_{nucleo} é o índice de refração do núcleo, $n_{substrato}$ é o índice de refração do meio envolvente ao núcleo, β é a constante de propagação do modo. Abaixo do ângulo definido pela expressão 2.39 teremos um "taper" adiabático e acima deste valor um "taper" com perdas elevadas. Para parâmetros típicos da tecnologia sol-gel, resulta $\theta = 0.098rad$ (5.6°)

Outra análise para o mesmo problema é proposta em [13], centrando-se na análise de um guia em canal de largura variável $\rho(z)$. As equações de decomposição do campo de uma secção do "taper" nos modos da secção seguinte é efectuada, e é determinado o ângulo de divergência máximo, dado pela expressão 2.40.

$$\theta = \frac{\lambda}{2n_{nucleo}\rho(z)} \quad (2.40)$$

A análise desta expressão permite concluir que os "taper" lineares devem apresentar menor conversão adiabática (maior perda) que os "taper" de forma parabólica côncava. No artigo [13] são apresentados "tapers" parabólicos e lineares, concluindo-se que, teoricamente, é possível fabricar um "taper" parabólico (ver figura 2.10) com transferência de potência máxima de 7% para o terceiro modo (apresenta desempenho superior ao "taper" linear), que obedece à expressão 2.40. Para tecnologia sol-gel, a equação 2.40 resulta em $\theta = 0.10 rad$ (6.16°). Ambas as referências fornecem valores concordantes.

O "taper" pode ser parametrizado usando as variáveis da figura 2.10. O programa de simulação numérica utilizado permite definir as grandezas w ,

$2w$ e t .

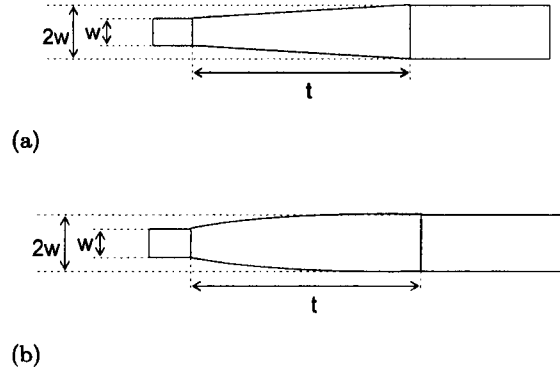


Figura 2.10: Parametrização de "taper": (a) linear (b) parabólico.

ii-Curvatura em S

As curvas em S são guias de onda constituídos a partir de secções concordantes de forma circular ou de outra forma geométrica que promova a guiagem da luz através de um percurso que não é linear. As curvaturas em S foram usadas em três configurações disponíveis no programa de desenho, que são curvaturas com arcos de circunferência de raios simétricos (arc S-bend), curvaturas em seno (sin S-bend) e em coseno (cos S-bend). A S-bend em arco tem largura constante e é construída em torno de dois arcos de circunferência com curvaturas opostas; as linhas centrais de ambas as secções começam e acabam horizontais. As S-bend em seno e em coseno também apresentam largura constante e são definidas pelas expressões 2.41 e 2.42, respectivamente:

$$x(z) = x(s) + \frac{x_e - x_s}{z_e - z_s}(z - z_s) + \frac{x_e - x_s}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{x_e - x_s}(z - z_s)\right) \quad (2.41)$$

$$x(z) = x(s) + A \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi}{P}(z - z_s)\right) \right] \quad (2.42)$$

em que (x, z) é a posição final do guia curvo (no plano XOZ), (x_s, z_s) são as coordenadas do início da curva e (x_e, z_e) são as coordenadas do ponto final da curva. Os parâmetros A e P são, respectivamente, a amplitude e o período da curva em coseno.

A curvatura "arc S-bend" pode ser parametrizada usando as variáveis da

figura 2.11. O programa de simulação numérica utilizado permite definir as grandezas s e c .

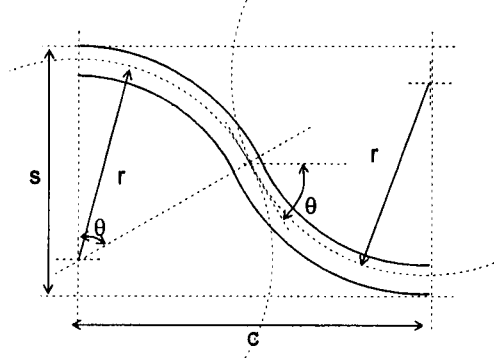


Figura 2.11: Parametrização de Curvatura em S por sobreposição de dois arcos de circunferência.

Podem ser escritas as seguintes relações entre as variáveis:

$$\begin{aligned} r &= \frac{c^2 + s^2}{4s} \\ \cos(\theta) &= \frac{c^2 - s^2}{c^2 + s^2} \end{aligned} \quad (2.43)$$

A implementação de curvas em S implica a existência de perda, de acordo com as expressões estabelecidas em [11]. A análise destas estruturas pode ser realizada efectuando uma transformação conforme, em que é transformado um guia com curvatura no espaço real num guia rectilíneo (no espaço conforme), com índice de refração equivalente (alterado do espaço real para o espaço conforme). Este índice de refração equivalente difere do primeiro, sendo definido pela expressão 2.44.

$$n_{eq}^2(r) = n^2(r) + 2n_{nucleo}^2 \frac{r}{R_c} \cos(\phi) \quad (2.44)$$

em que $n(r)$ é o índice real em função do raio, n_{nucleo} é o índice do núcleo do guia, R_c é o raio de curvatura e (r, ϕ) são as coordenadas (polares) do plano da curva. Se $n^2(r)$ é uma constante, então n_{eq}^2 tem perfil linear com declive proporcional a $1/R_c$ (raios de curvatura menores provocam maior declive no perfil de índice equivalente). O problema de optimização desta estrutura pode ser entendido como a definição do raio de curvatura que minimiza a perda por acoplamento de um guia rectilíneo (com perfil de índice quadrado) a um guia com perfil definido pela expressão 2.44 de n_{eq} . Pode

ser determinada a ordem de grandeza da perda introduzida pela curvatura através da expressão 2.45, proposta em [11].

$$\gamma = \frac{\sqrt{\pi}}{2R_c} \frac{V^4 S^2}{W^{3/2}} \text{erf}^4 \left(\frac{1}{\sqrt{2}S} \right) \left(\frac{R_c}{\rho} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{-4R_c W^3 \Delta}{3\rho V^2} \right) \quad (2.45)$$

em que os parâmetros apresentados têm as expressões dadas anteriormente e S é um parâmetro definido pela expressão numérica 2.35, apresentada na secção 2.4. Para valores de fabricação típicos da tecnologia de sílica sobre silício, refere-se em [11] que são admitidas curvaturas com raio mínimo de 2mm sem perda significativa.

iii-Cruzamento em X

Os cruzamentos em X são de importância vital para diminuir o tamanho dos circuitos ópticos integrados. São caracterizados por dois guias de onda que se intersectam segundo um determinado ângulo, que determina as propriedades do cruzamento.

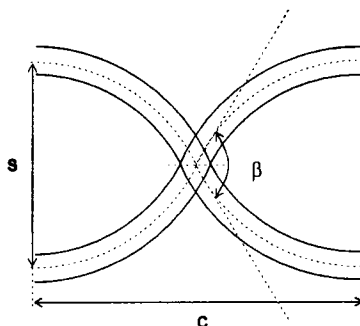


Figura 2.12: Parametrização de cruzamento em X implementada por duas curvaturas em S.

O cruzamento de dois guias de onda será implementado em vários dispositivos, nomeadamente em combinadores coaxiais e matriciais de três feixes. É fundamental perceber qual o comportamento deste tipo de estruturas em função do ângulo de cruzamento dos guias. O parâmetro central nesta discussão é o "crosstalk", que mede a transferência de potência de um ramo para outro ramo concorrente. A análise dos cruzamentos é feita dividindo-os em dois grupos principais [11]: junção com ângulo recto e junção com ângulo agudo (menor que 90°). É usado o princípio de que os modos que são excitados num guia (no caso de interesse, apenas o modo fundamental se

propaga), se difractam na zona de intersecção e que existe acoplamento do campo difractado aos modos do guia concorrente e do próprio guia que se encontra em frente.

Quando a intersecção é feita segundo um ângulo recto, a transferência de potência pode ser quantificada pela expressão 2.46, apresentada em [11]:

$$L = \frac{\Delta}{V^2} \left(\frac{\rho}{s} \right)^4 \quad (2.46)$$

em que s é largura da gaussiana que aproxima o campo eléctrico (em $1/e$), e Δ , ρ e V têm as expressões indicadas atrás. Se a intersecção é feita segundo um ângulo θ (em radianos) a expressão é alterada para a expressão 2.47 (assumindo aproximação de guiagem fraca) [11]:

$$L = \frac{\Delta}{V^2} \left(\frac{\rho}{s} \right) e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{s} \right)^2 \theta^6} \quad (2.47)$$

Para valores de Δ baixos e de θ perto de $\pi/2$ rad é fácil verificar que a perda será muito baixa. A questão do "crosstalk" torna-se importante para ângulos menores que $\pi/2$ rad, pois nesta situação pode existir acoplamento significativo de potência entre os guias concorrentes. Em [11] é usado o argumento de que só será significativo o "crosstalk" se as velocidades de fase dos campos dos modos fundamentais forem próximas. Este raciocínio conduz à expressão 2.48, para o ângulo a partir do qual o "crosstalk" será baixo,

$$\theta < \frac{\pi}{2} - \sqrt{2\Delta} \frac{U}{V} \quad (2.48)$$

em que $U = k\rho\sqrt{n_{nucleo}^2 - n_{eff}^2}$, e os restantes parâmetros têm as expressões apresentadas acima.

Para valores de fabricação típicos da tecnologia de sílica sobre silício, [11] anuncia o valor de $\theta < 86.7^\circ$ como o ângulo a partir do qual haverá "crosstalk" significativo.

Esta função vai ser analisada partindo da parametrização proposta na figura 2.12. O ângulo β da figura é dado pela expressão 2.49, obtida a partir das equações 2.43.

$$\beta = 2 \arccos \left(\frac{c^2 - s^2}{c^2 + s^2} \right) \quad (2.49)$$

iv-Junção em Y

Esta é a função mais reproduzida em máscaras de dispositivos combinadores de feixe devido às suas propriedades de excelente acromaticidade [12]. Esta estrutura desempenha um papel central se a combinação for feita no esquema coaxial aos pares (ver secção 1.3 para mais detalhes).

Esta análise pode servir para o estudo de uma divisão em Y ou para a junção combinadora em Y. Os dois conceitos serão utilizados ao longo deste texto.

A função pode ser entendida como um "taper" e duas saídas que são caracterizadas por um ângulo de divergência dos guias de saída. Uma vez otimizado o "taper" e a curvatura em S, é possível construir uma junção Y com saídas em S apresentando perda baixa. Se a configuração escolhida for a saída com guias lineares, a otimização prende-se apenas com o ângulo de divergência das saídas.

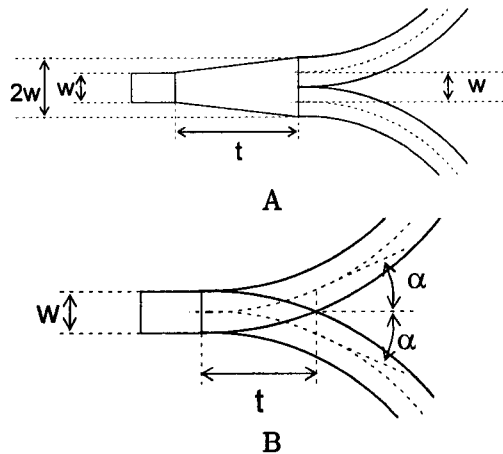


Figura 2.13: Parametrização de junções em Y: A-"taper" linear com saídas em S; B-"taper" construído por sobreposição de curvaturas em S.

Esta estrutura foi bastante estudada: foram estabelecidas expressões [4], e realizadas simulações numéricas usando o BPM [1], que permitem identificar os regimes de funcionamento desta estrutura como divisor de potência, e estabelecidos parâmetros aceitáveis de funcionamento (perda abaixo de $3.1dB$ sem conversão modal) que conduziram a ângulos de divergência entre 2° e 3° para fabricação na tecnologia de sílica sobre silício.

Esta estrutura pode ser implementada por várias formas, mas nesta dissertação apenas são utilizadas as estruturas parametrizadas na figura 2.13.

Os parâmetros da curva apresentada em 2.13 (que estão relacionados com os parâmetros c , s e r da curva, definidos na figura 2.11), são dados

pela equação 2.50:

$$t = \sqrt{\frac{w^2}{4} + \frac{w(s^2 + c^2)}{4s}} \quad \alpha = \arccos\left(\frac{1}{1 + \frac{w}{2r}}\right) \quad (2.50)$$

v- Acoplador Direccional Acromático

A optimização de acoplador direccional acromático segue a análise proposta em [20]. Existe particular interesse em conseguir parametrizar um acoplador direccional acromático para combinação ou divisão de dois feixes.

Segundo a teoria de modos acoplados, as potências acopladas entre guias paralelos e sem perda num percurso de acoplamento L podem ser expressas na forma das equações 2.51.

$$\begin{aligned} P_1 &= 1 - (\kappa^2/\delta^2) \sin^2(\delta L) \\ P_2 &= (\kappa^2/\delta^2) \sin^2(\delta L) \end{aligned} \quad (2.51)$$

Nestas expressões, κ é a constante de acoplamento e δ é dado pela expressão 2.52, onde β_1 e β_2 são as constantes de propagação dos guias paralelos acoplados.

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2}\right)^2 + \kappa^2} \quad (2.52)$$

Nas expressões 2.51, o factor (κ^2/δ^2) representa a potência máxima que é possível transferir. A fase δL determina a posição dos máximos de P_1 e P_2 para cada comprimento de onda. A potência transmitida em função do comprimento de onda é intrinsecamente dependente do comprimento de onda. A dependência em comprimento de onda pode ser manipulada através do termo (κ^2/δ^2) . Os parâmetros κ e δ são dependentes dos parâmetros dos guias de onda paralelos, como a largura, a altura e a separação dos guias ou a diferença de índice entre os guias e o meio envolvente.

O estudo da resposta destas funções com o comprimento de onda é dependente de muitos parâmetros, razão pela qual é realizado o estudo de cada configuração através de simulação numérica do acoplador a parametrizar, enquadrada pelos princípios de resposta apresentados acima.

Podem ser desenhados vários tipos de acopladores direccionais, que são enquadrados por [21] de acordo com a tabela 2.1.

Em [20] demonstra-se que é possível fabricar acopladores direccionais

Designação	Representação	Características
Acoplador Direccional Uniformemente Simétrico (US)		Guias iguais com separação constante
Acoplador Direccional Uniformemente Assimétrico (UA)		Guias diferentes com separação constante
Acoplador Direccional Assimétrico Ponto a Ponto (SP)		Guias de secção variável com separação constante
Acoplador Direccional Não Simétrico (NS)		Guias diferentes com separação variável

Tabela 2.1: Acopladores direccionais com diferentes geometrias.

com transferência de qualquer fracção de potência na banda espectral de $1.1\mu m$ a $1.9\mu m$, na tecnologia de sílica sobre silício.

vi- Alargamento da Frente de Onda

A divergência de uma onda pode ser avaliada realizando a simulação de um guia de largura w que introduz luz num meio de largura bastante elevada, de acordo com a figura 2.14. O objectivo é determinar a largura do guia de entrada a partir da qual a divergência do feixe não é significativa e usar essa largura como largura final dos "tapers" de alargamento da frente de onda, em combinação multiaxial.

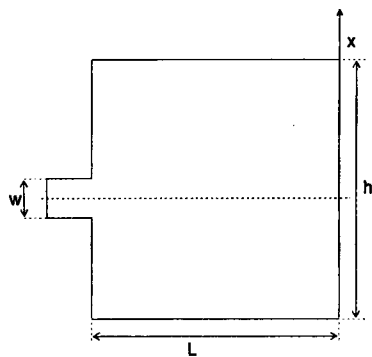


Figura 2.14: Parametrização da estrutura utilizada para avaliação do alargamento da frente de onda.

Para avaliar o alargamento da frente de onda foi realizado o integral de sobreposição entre o modo fundamental do guia na entrada e o campo na

face final da zona de propagação livre (C_0), dado pela expressão 2.53, em que $e_{fundamental}$ é o modo fundamental do guia de entrada e e_{saida} é o campo obtido na face de saída da secção altamente multimodo:

$$C_0 = \int e_{fundamental} e_{saida} dx \quad (2.53)$$

v- Acoplamento Entre Guias Vizinhos

No projecto de combinadores multiaxiais é necessário assegurar, numa região específica, que o acoplamento entre guias vizinhos de largura previamente definida não ultrapassa um valor específico. É conhecido que o acoplamento deve ser tanto maior quanto mais próximos estiverem os guias, razão pela qual foi estudada a separação mínima entre guias com largura w de forma a garantir que o acoplamento tem valor desprezável. Partindo da estrutura da figura 2.15, são simuladas várias distâncias entre guias, e avaliado o campo num guia quando é introduzido campo no guia vizinho.

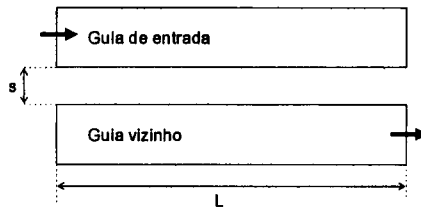


Figura 2.15: Parametrização de estrutura utilizada para avaliação de alargamento da frente de onda.

A constante de acoplamento pode ser determinada a partir da equação 2.54, em que L é o comprimento da zona de acoplamento, P_0 é a potência no modo fundamental do guia de entrada e P_i é a potência no modo i , do guia "vizinho":

$$k = \frac{1}{L} \arcsin \left(\sqrt{\frac{P_i}{P_0}} \right) \quad (2.54)$$

É conhecido que a constante de acoplamento decresce de acordo com uma função exponencial, com o aumento de s , na aproximação de acoplamento fraco.

2.4 Optimização de Funções usando BPM-CAD

Para efectuar simulações foi utilizado o software de simulação numérica *OptiBPM* da *Optiwave*, que usa o método de propagação de feixe (BPM) e permite optar por BPM de diferenças finitas (BPM-FD) ou elementos finitos (BPM-FE). Quanto à formulação do propagador BPM, o programa permite optar por aproximações paraxiais, ou PADE(1,1) até PADE(4,4).

O programa permite definir o número de pontos da malha (ou, alternativamente, o número de pontos por unidade de comprimento), a polarização em análise (TE ou TM), o passo de propagação e tipo de condições fronteira a usar (PML, TBC, Dirichlet, Neumann).

Em todas as simulações efectuadas (salvo indicação em contrário) foi usado BPM-FD com aproximação PADE (2,2). A malha usada é de 5 pontos por micrómetro e as condições fronteira utilizadas são TBC (transparent boundary conditions).

Todos os resultados de potência apresentados adiante correspondem à potência no modo fundamental do guia de saída quando todos os guias de entrada são excitados com o modo fundamental. A potência total na entrada é unitária.

i-Guia em Canal de Largura Variável ou "taper"

Para este estudo foi desenhado um "taper" parabólico e um "taper" linear, e comparados os resultados. As dimensões da janela de cálculo são de $(7500 \times 70) \mu m^2$. A largura do "taper" na entrada é $a = 4.0 \mu m$ e na saída é de $b = 8.0 \mu m$. Varia-se o parâmetro c , que corresponde ao comprimento do "taper", assim como a forma do "taper": linear ou parabólico (figura 2.10). Os resultados da simulação estão na tabela 2.2, e a sua representação gráfica na figura 2.16.

Ambas as configurações de "taper" apresentam aumento da potência de saída com o aumento do comprimento do "taper" até ao comprimento aproximado de $400 \mu m$, valor a partir do qual apresentam queda significativa de potência no modo fundamental. O desempenho do "taper" parabólico é muito semelhante ao do "taper" linear, com valores mais elevados de transmissão de potência para o "taper" parabólico como previsto em [11]. O valor máximo de potência transmitida é cerca de 97% da potência de entrada. Se for analisada a expressão 2.39 (para o guia de sol-gel ter-se-á $V = 1.66$, $W = 4.2382$, $\Delta = 0.0065$), resulta que o ângulo máximo será da ordem dos 0.098 rad (5.6°), o que é verificado através da análise da terceira coluna da tabela 2.2.

$c/\mu m$	$\theta/^{\circ}$	P_{lin}/P_0	P_{par}/P_0
100	1,14576	0,958	0,954
125	0,91665	0,961	0,959
150	0,76390	0,963	0,962
175	0,65478	0,964	0,963
200	0,57294	0,964	0,964
305	0,37538	0,965	0,965
511	0,22446	0,964	0,965
716	0,16009	0,964	0,964
921	0,12441	0,962	0,963
1126	0,10174	0,961	0,962
1332	0,08606	0,960	0,961
1537	0,07456	0,960	0,961
1742	0,06578	0,960	0,960
1947	0,05884	0,960	0,960
2153	0,05323	0,960	0,960
2358	0,0486	0,961	0,961
2563	0,04471	0,962	0,961
2768	0,04139	0,962	0,961
2974	0,03854	0,961	0,961
3179	0,03605	0,961	0,961
3384	0,03386	0,961	0,961
3589	0,03192	0,961	0,961
3795	0,03020	0,961	0,961
4000	0,02865	0,960	0,961

Tabela 2.2: Resultados de simulação numérica de "tapers" linear e parabólico.

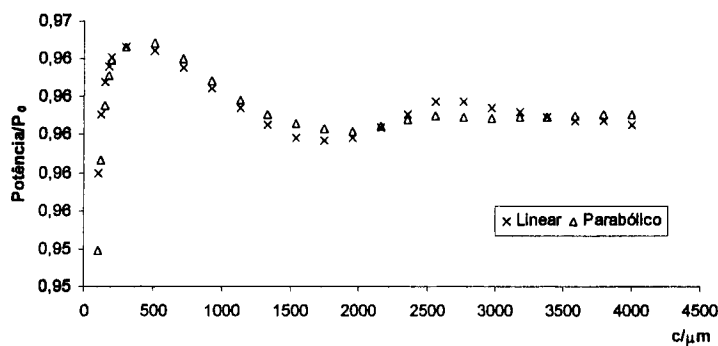


Figura 2.16: Resultados de simulação numérica de "tapers" linear e parabólico. Parâmetros de simulação no texto.

ii-Curvatura em S

Para este estudo foram desenhadas curvas com as formas permitidas pelo programa de simulação. As dimensões da janela de cálculo são de $(20000 \times 300)\mu m^2$. A largura do guia é constante e igual a $4.0\mu m$. Varia o parâmetro c da figura 2.11, e mantém-se fixo o parâmetro $s = 250\mu m$. Determinou-se a potência na saída em função do parâmetro c . Os resultados obtidos estão na tabela 2.3 e no gráfico da figura 2.17.

$c/\mu m$	c/s	P_{sin}/P_0	P_{cos}/P_0	P_{arc}/P_0	raio/mm
1000	8	0,180	0,396	0,236	2,03
1250	10	0,547	0,713	0,628	3,16
1500	12	0,802	0,851	0,815	4,53
1750	14	0,895	0,895	0,878	6,16
2000	16	0,918	0,907	0,873	3,16
3000	24	0,921	0,919	0,892	4,53
4000	32	0,919	0,919	0,894	6,16
5000	40	0,918	0,917	0,892	8,03
6000	48	0,915	0,917	0,890	18,03
7000	56	0,914	0,914	0,889	32,03
8000	64	0,912	0,910	0,886	50,03
9000	72	0,909	0,907	0,883	72,03
10000	80	0,905	0,904	0,880	98,03

Tabela 2.3: Resultados de simulação numérica de curvatura em S. A potência no modo fundamental é normalizada pela potência à entrada.

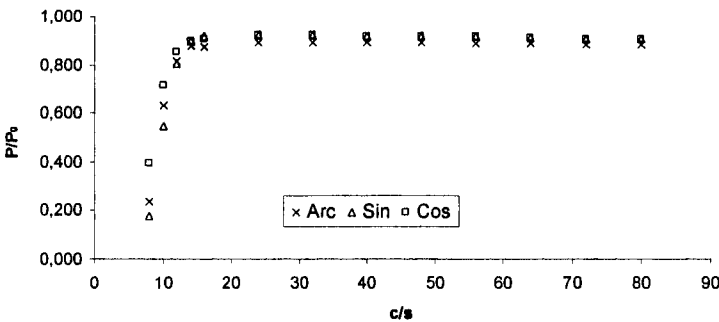


Figura 2.17: Resultados de simulação numérica de curvaturas em S. Parâmetros de simulação no texto.

As curvaturas testadas apresentam uma saída máxima da ordem dos 90% da potência à entrada para valores de c/s compreendidos entre 15 e 50. O

raio de curvatura para estes valores está compreendido entre 3 mm e 100 mm. Verifica-se comportamento muito semelhante para os três tipos de curvatura definidos pelo programa de simulação, com desempenho mais favorável para a curva em coseno. A expressão 2.45 produz a linha a cheio do gráfico da figura 2.18. Na mesma figura os valores obtidos pela simulação BPM estão marcados com cruces. Verifica-se um ajuste razoável dos resultados numéricos à expressão apresentada.

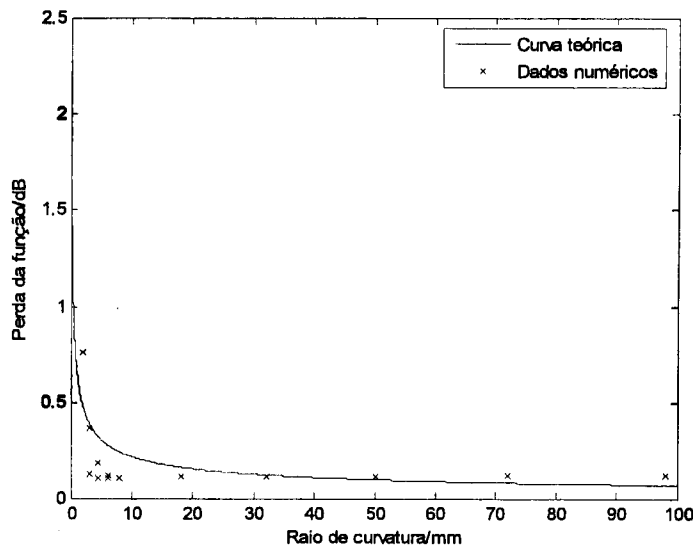


Figura 2.18: Comparação entre os valores obtidos pela expressão 2.45 e os valores calculados por BPM, para a curvatura em S.

iii-Cruzamento em X

O cruzamento é excitado através da introdução da potência P_0 num dos braços. São determinadas as potências P_1 e P_2 nos dois ramos de saída, e o "crosstalk", definido pela expressão:

$$crosstalk = \frac{P_2}{P_1 + P_2}.$$

As dimensões da janela de cálculo são de $(20000 \times 300)\mu m^2$. A largura do guia é constante e igual a $4\mu m$. Mantém-se fixo o parâmetro $s = 250\mu m$ e varia-se o parâmetro c da figura 2.12. Os resultados estão na tabela 2.4 e os gráficos com os valores desta tabela na figura 2.19.

O cruzamento de duas curvaturas em S com a relação c/s que minimiza as perdas provoca "crosstalk" da ordem dos $-37dB$ no melhor dos casos (valor limite em termos de potência transmitida), pelo que podemos concluir que

$c/\mu m$	P_1/P_0	P_2/P_0	$\frac{P_1+P_2}{P_0}$	%crosstalk	crosstalk/dB	$\alpha/^\circ$
2000,0	0,770	0,000	0,770	0,0%	-37,0	28,5
2555,6	0,898	0,000	0,898	0,0%	-35,4	22,3
3111,1	0,915	0,001	0,915	0,1%	-31,6	18,4
3666,7	0,914	0,003	0,916	0,3%	-25,5	15,6
4222,2	0,909	0,006	0,916	0,7%	-21,7	13,6
4777,8	0,904	0,010	0,915	1,1%	-19,5	12,0
5333,3	0,898	0,014	0,911	1,5%	-18,3	10,7
5888,9	0,892	0,015	0,907	1,6%	-17,8	9,7
6444,4	0,885	0,015	0,899	1,6%	-17,9	8,9
7000,0	0,878	0,013	0,891	1,4%	-18,4	8,2

Tabela 2.4: Resultados de simulação numérica de cruzamento de duas curvaturas em S-arco. A potência no modo fundamental é normalizada pela potência à entrada.

esta solução é a mais adequada para realizar o cruzamento de dois guias (os resultados são aceitáveis a partir de $-25dB$).

iv-Junção em Y

A divisão de potência por uma junção Y foi estudada em função da distância entre as saídas quando é usado um "taper" com comprimento $t = 400\mu m$, que alarga desde $4.0\mu m$ até $8.0\mu m$. As saídas têm comprimento c que é mantido constante ($c = 5000\mu m$) e largura $4.0\mu m$. Fez-se variar a distância s entre as saídas para guias lineares e para curvas em S (arco). A divisão do feixe foi ainda feita através da sobreposição de duas curvaturas S em arco com a mesma origem. Foi colocado um "taper" sobre esta estrutura para simular a vantagem ou desvantagem da sua utilização. Os resultados de simulação numérica estão nas tabela 2.5 e no gráfico da figura 2.20.

A junção Y com "taper" otimizado permite verificar que à saída teremos o máximo de 99% da potência à entrada, quer a saída seja feita com guia a direito, quer seja feita com S-bend. Verifica-se um excelente equilíbrio de potências entre as saídas do Y. A análise do gráfico da potência em função da separação angular das saídas (no caso guia a direito) permite verificar que ângulos acima de 4° levam a eficiência da função para valores abaixo dos 80%.

A implementação de junções em Y a partir de sobreposição de duas curvaturas em S com a mesma origem apresenta maior eficiência relativamente aos resultados obtidos para as outras configurações, se forem utilizados os parâmetros de optimização para as curvas em S. Os resultados são explicados pelo ângulo de divergência menor para a configuração que apresenta máxima

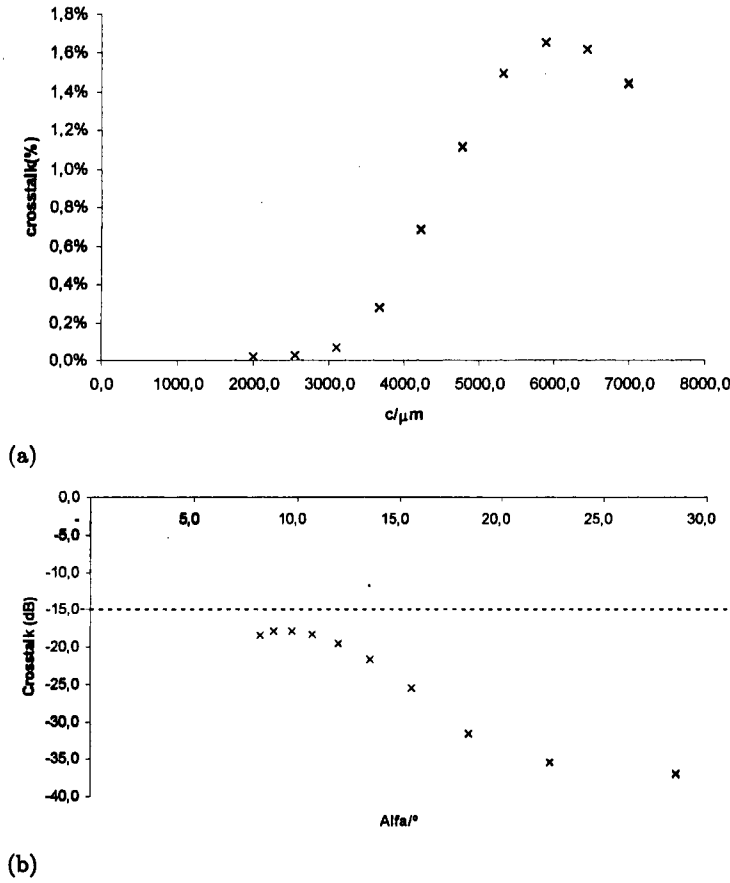


Figura 2.19: Resultados de simulação numérica de cruzamentos em X. Parâmetros de simulação no texto.

potência na saída. A introdução de "taper" linear ou "taper" parabólico não apresenta melhorias significativas em termos de potência nas saídas.

Para futura análise de tolerâncias foi utilizado um taper linear que interrompe a junção em Y ("tip"). A largura total do "tip" foi calculada a partir da expressão 2.55, onde r é o raio de curvatura dado por 2.43:

$$tip = 2 \left[r - \sqrt{\left(r + \frac{w}{2} \right)^2 - (t + \Delta t)^2} \right] \quad (2.55)$$

Foi simulada a existência deste "tip" a partir da variação do comprimento Δt da secção que interrompe a junção em Y (ver figura 2.22).

A simulação foi realizada para a separação entre saídas $s = 250\mu m$ e com o comprimento $c = 2000\mu m$. Foi variado o comprimento de Δt de acordo

$s/\mu m$	Saída linear	Saída em S	Feita com S	Saída S com taper linear	Saída S com taper parabólico
10,0	0,467	0,495	0,494	0,499	0,500
31,1	0,449	0,491	0,488	0,487	0,485
52,2	0,430	0,488	0,486	0,483	0,481
73,3	0,399	0,482	0,486	0,483	0,479
94,4	0,352	0,465	0,478	0,476	0,469
115,6	0,303	0,443	0,471	0,466	0,456
136,7	0,247	0,403	0,459	0,450	0,434
157,8	0,199	0,364	0,452	0,445	0,430
178,9	0,153	0,308	0,443	0,434	0,419
200,0	0,116	0,252	0,433	0,423	0,406

Tabela 2.5: Resultados de simulação numérica de divisores de potência em Y.

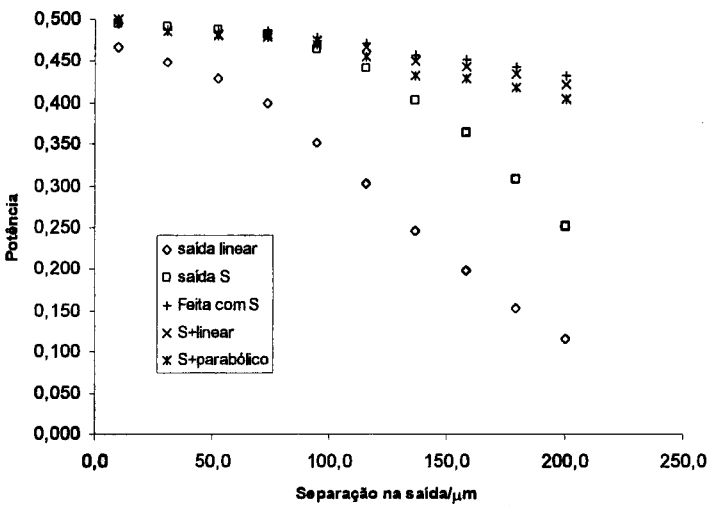


Figura 2.20: Resultados de simulação numérica de divisão de potência. Parâmetros de simulação no texto.

com a tabela 2.6:

Os resultados mostram que se existir um "tip" maior que $2\ \mu m$ existe diminuição da potência em cada saída de cerca de $0.430\ P_0$ para cerca de $0.400\ P_0$, o que representa uma diminuição relativa de cerca de 7.5% na potência de saída.

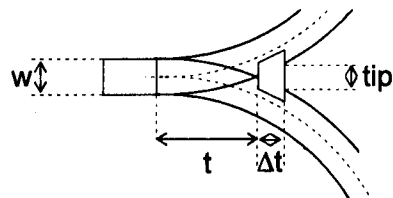


Figura 2.21: Detalhe da simulação de "tip" nas junções em Y.

$\Delta t/\mu m$	$tip/\mu m$	P/P_0
10	0,459	0,427
20	0,943	0,421
30	1,45	0,416
40	1,98	0,403
50	2,54	0,390
60	3,12	0,372
70	3,73	0,353
80	4,37	0,331
90	5,03	0,307
100	5,71	0,282

Tabela 2.6: Resultados de simulação numérica de "tip"em junção em Y.

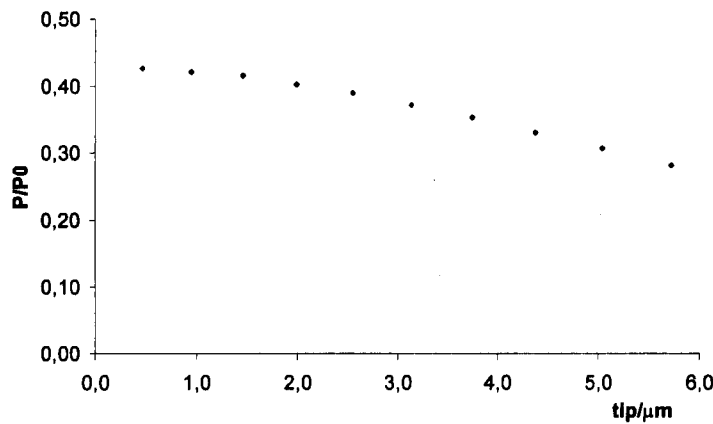


Figura 2.22: Simulação numérica de "tip"em junção em Y ($s=250\mu m;c=2000\mu m$).

v-Acoplador Acromático

A otimização de acoplador direccional acromático para funcionar como divisor de potência partiu de acoplador direccional uniformemente assimétrico (UA), que foi sendo sucessivamente alterado até encontrar o desempenho em

comprimento de onda desejado. Foi primeiro observada a dependência em comprimento de onda do acoplador simétrico e foram testadas soluções de acromaticidade, como guias de secção variável e separação variável entre os guias. A otimização desta função é bastante empírica, pois resulta de tentativa e erro para obter a resposta em comprimento de onda o menos dependente do comprimento de onda que foi possível.

A função implementada corresponde à imagem da figura 2.23. A parametrização da estrutura é feita de acordo com o diagrama da figura 2.24.

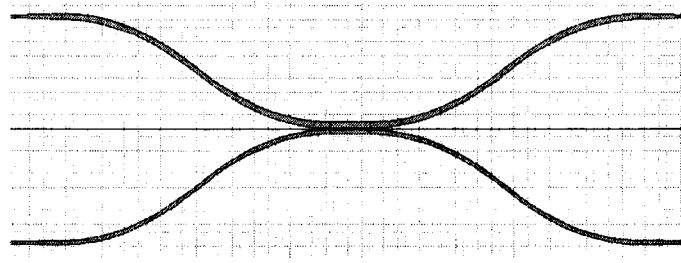


Figura 2.23: Acoplador direccional acromático otimizado.

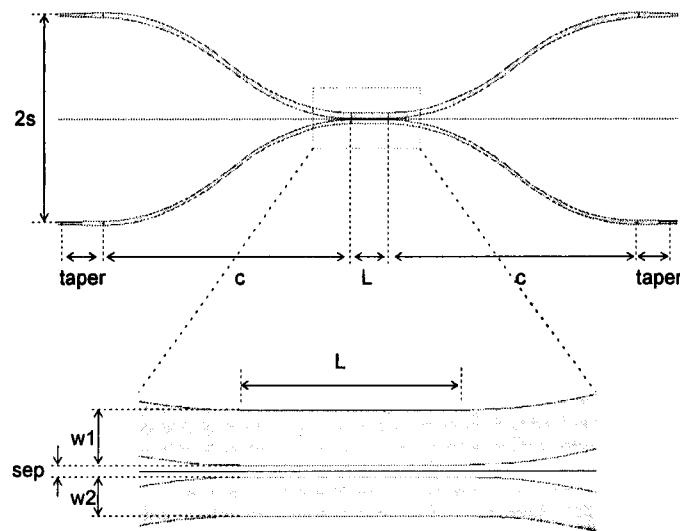


Figura 2.24: Parametrização de acoplador direccional simulado numericamente.

Na simulação numérica foram usados os valores da tabela 2.7 para os parâmetros indicados na figura 2.24.

A potência nas duas saídas, quando o braço superior da figura 2.23 foi excitado, foi simulada e registada, tendo sido obtidos os resultados da tabela

Parâmetro	Valor/ μm
c	3000
s	125
w1	7.0
w2	5.0
sep	1.5
L	450
taper	500

Tabela 2.7: Parâmetros utilizados na simulação numérica de acoplador direccionado acromático.

2.8, para os comprimentos de onda da banda de observação astronómica J, e os resultados no gráfico da figura 2.25.

$\lambda/\mu m$	P_1	P_2
1.10	0.506	0.414
1.20	0.440	0.487
1.30	0.419	0.515
1.40	0.449	0.490

Tabela 2.8: Resultados de simulação numérica de combinador com acoplador direccionado. Os valores apresentados correspondem à potência em cada saída, normalizada pela potência na entrada, quando só uma entrada é excitada.

Os resultados mostram que as saídas apresentam, na pior das situações, discrepância de $0.10P_0$ entre as saídas, na banda de observação astronómica J. A maior discrepância é obtida no centro da banda astronómica. A vantagem de utilizar esta função em detrimento da junção em Y é não radiar 50% da potência na operação em banda larga e possibilitar aumento em fase de $\pi/2$ na passagem de campo de um braço para o outro.

Foi verificada a tolerância de fabricação dos parâmetros *sep*, *w1*, *w2* e *L*. Os resultados estão nas tabelas 2.9 a 2.12. Os gráficos com a representação das tolerâncias estão na figura 2.26 (o comprimento de onda usado nestas simulações foi $\lambda_0 = 1.25\mu m$).

A análise de tolerâncias indica que a fabricação deste combinador pode ser implementada se houver elevado controlo na fabricação da função. A tolerância de fabricação é baixa nos parâmetros *w1*, *w2* e *sep*, pois variações de $0.5\mu m$ provocam variação significativa em potência nas saídas. A análise de tolerância de fabricação permite verificar que divisões de outras fracções de potência (60%:40%, por exemplo) podem ser obtidas por ajuste do parâmetro *L*.

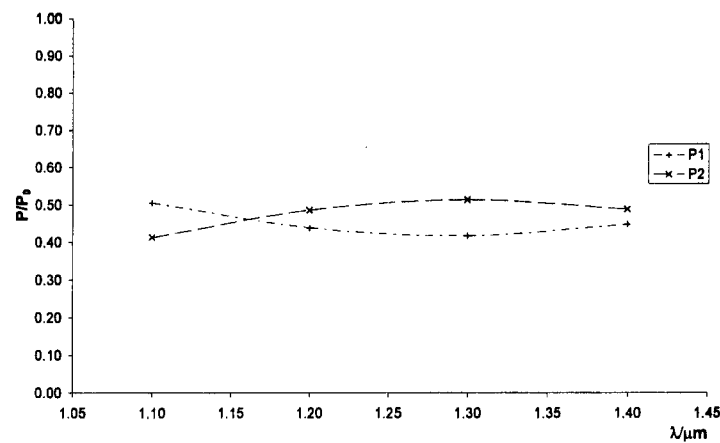


Figura 2.25: Saída em função do comprimento de onda para a banda J.

<i>sep</i> / μm	P_1	P_2
1.0	0.69	0.22
1.2	0.63	0.27
1.4	0.52	0.39
1.6	0.46	0.45
1.8	0.40	0.52
2.0	0.35	0.56

Tabela 2.9: Tolerância de fabricação do parâmetro *sep* de acoplador direcional acromático.

$L/\mu m$	P_1	P_2
400	0.39	0.51
420	0.42	0.48
440	0.45	0.46
460	0.49	0.43
480	0.52	0.41
500	0.55	0.38

Tabela 2.10: Tolerância de fabricação do parâmetro *L* de acoplador direcional acromático.

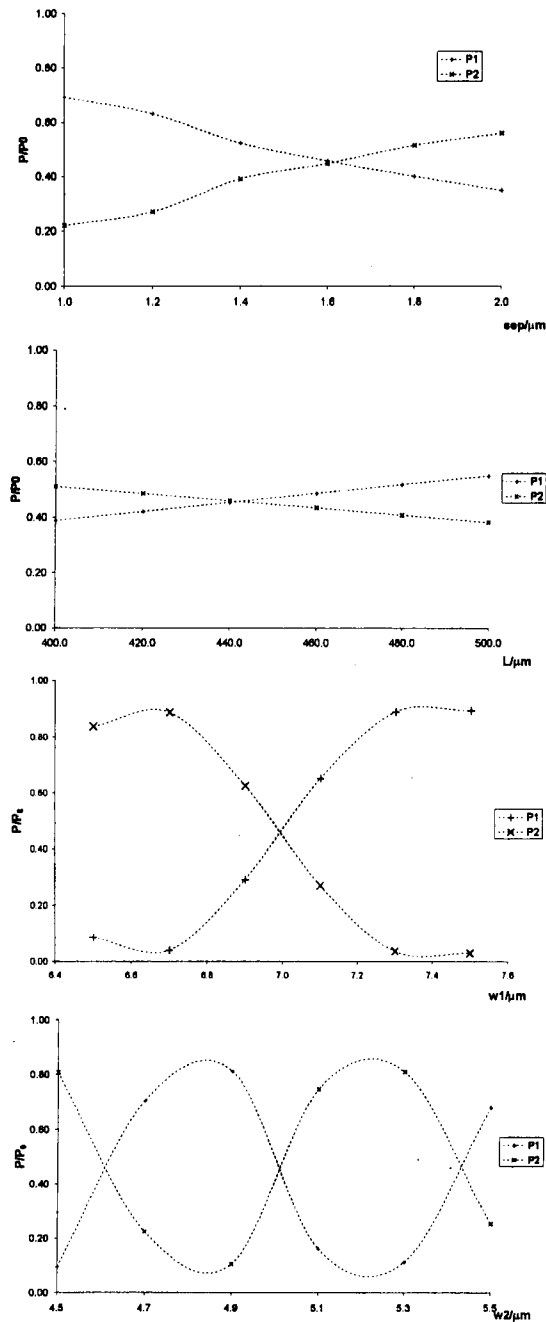


Figura 2.26: Tolerância de fabricação dos parâmetros a) sep , b) L , c) $w1$ e d) $w2$ de acoplador direccional acromático, para $\lambda_0 = 1.25\mu m$.

$w1/\mu m$	P_1	P_2
6.5	0.09	0.84
6.7	0.04	0.89
6.9	0.29	0.63
7.1	0.65	0.27
7.3	0.89	0.04
7.5	0.89	0.03

Tabela 2.11: Tolerância de fabricação do parâmetro $w1$ de acoplador direcional acromático.

$w2/\mu m$	P_1	P_2
4.5	0.09	0.81
4.7	0.71	0.23
4.9	0.81	0.10
5.1	0.16	0.75
5.3	0.11	0.81
5.5	0.68	0.25

Tabela 2.12: Tolerância de fabricação do parâmetro $w2$ de acoplador direcional acromático.

vi-Alargamento da Frente de Onda

Usando o esquema de princípio da figura 2.14, foi calculado o parâmetro C_0 indicado na equação 2.53. Os parâmetros utilizados foram $L = 9500\mu m$ e $h = 900\mu m$. Fez-se variar o parâmetro w e determinou-se o parâmetro C_0 , para cada largura w . Os resultados estão na tabela 2.13 e a sua representação gráfica na figura 2.27.

$w/\mu m$	C_0
100.0	0.69
111.1	0.76
122.2	0.82
133.3	0.86
144.4	0.89
155.6	0.91
166.7	0.93
177.8	0.94
188.9	0.95
200.0	0.96

Tabela 2.13: Variação do parâmetro C_0 com a largura do guia de entrada w .

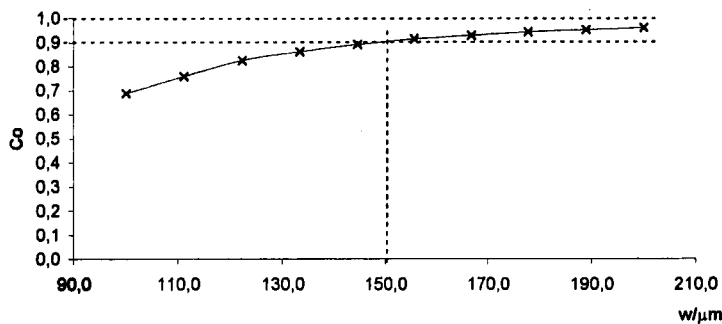


Figura 2.27: Varia  o do parâmetro C_0 com a largura do guia de entrada w . ($L=9500\ \mu m$; $h=900\ \mu m$)

$s/\mu m$	P_1/P_0	P_2/P_0	$(P_1 + P_2)/P_0$	k_0/cm^{-1}
0.56	0.704	9.85×10^{-4}	0.705	6.2782×10^{-3}
1.11	0.706	1.22×10^{-4}	0.706	2.2062×10^{-3}
1.67	0.706	2.20×10^{-5}	0.706	9.3743×10^{-4}
2.22	0.706	7.25×10^{-6}	0.706	5.3858×10^{-4}
2.78	0.706	1.41×10^{-6}	0.706	2.3756×10^{-4}
3.33	0.706	2.78×10^{-7}	0.706	1.0542×10^{-4}
3.89	0.706	5.43×10^{-8}	0.706	4.6614×10^{-5}
4.44	0.706	1.82×10^{-8}	0.706	2.6948×10^{-5}
5.00	0.706	3.55×10^{-9}	0.706	1.1916×10^{-5}

Tabela 2.14: Varia  o do coeficiente de acoplamento para o modo fundamental do guia vizinho k_0 , com a separa  o entre os guias s .

Os resultados mostram que, se for tomado 90% como um valor aceitável para a sobreposi  o entre os campos do guia de entrada e o campo obtido na saída, então a largura de $150\ \mu m$    a largura a partir da qual este desempenho pode ser obtido.

v-Acoplamento entre Guias Vizinhos

Para a separa  o entre guias s foi avaliado o campo no guia vizinho e calculado o coeficiente de acoplamento através da expressão 2.54. Os parâmetros utilizados foram $w = 150\ \mu m$ e $L = 5.0\ cm$; os resultados da simula  o numérica encontram-se na tabela 2.14 e a sua representa  o gráfica na figura 2.28.

A escala vertical do gráfico da figura 2.28    logarítmica. A análise dos pontos permite verificar bom ajuste    recta, o que confirma a dependência logarítmica da constante de acoplamento com a separa  o s entre os guias,

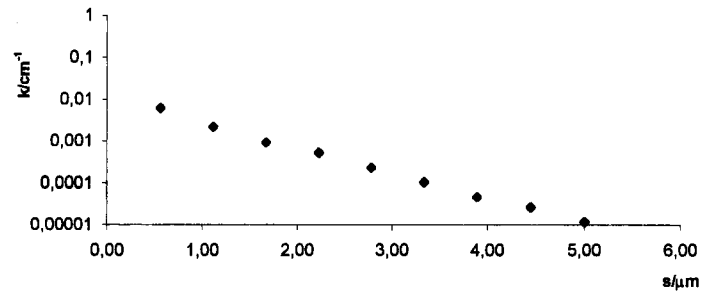


Figura 2.28: Variação do coeficiente de acoplamento com a separação entre os guias s . ($L=5.0$ cm; $w=150$ μm)

prevista pela teoria de acoplamento fraco.

Se se tomar $k = 10^{-5} cm^{-1}$ como um valor aceitável para admitir que o acoplamento é desprezável, isto é conseguido para separação $s=5$ μm entre guias de 150 μm de largura.

2.5 Conclusões

A optimização de funções em óptica integrada permitiu construir o resumo que se segue.

A perda apresentada neste resumo não inclui perda de propagação (determinada pelo programa de simulação numérica como 0.11dB/cm , usando para o efeito um guia linear).

"Taper" Deve ser utilizado taper linear com comprimento de $400\text{ }\mu\text{m}$ na transição $4\text{ }\mu\text{m}$ para $8\text{ }\mu\text{m}$. A perda intrínseca desta função é 0.01 dB .

Curvatura em S Com curvas em arco de circunferência utilizar raio de 50 mm , ou: para $s=125\text{ }\mu\text{m}$ usar $c=2000\text{ }\mu\text{m}$; $s=250\text{ }\mu\text{m}$ usar $c=4000\text{ }\mu\text{m}$. Perda intrínseca de 0.28 dB .

Cruzamento em X Com curvas em arco de circunferência correctamente dimensionadas o "crosstalk" está sempre abaixo de -15 dB . A perda intrínseca corresponde à perda das curvaturas em S (0.28 dB).

Junção em Y Pode ser implementada com duas curvaturas em S com a mesma origem ou com um "taper" linear seguido de duas curvaturas em S tangentes, com resultados semelhantes. A perda intrínseca é de 0.4 dB para divisão da frente de onda. Em combinação da frente de onda é esperada perda intrínseca de 3 dB para funcionamento em banda espectral larga. A existência de "tip" na separação é crítica pois valores de "tip" de $2\text{ }\mu\text{m}$ provocam 7.5% de diminuição de potência. Parâmetros de fabricação típicos permitem majorar o "tip" ao valor de $1\text{ }\mu\text{m}$.

Acoplador Direccional Acromático (UA) Foi usado um acoplador direccionado do tipo UA. Usando separação de $1.5\text{ }\mu\text{m}$ e comprimento da secção de acoplamento de $450\text{ }\mu\text{m}$, pode ser acoplada luz na banda de observação astronómica J, com diferença de potência máxima de 10% . As larguras dos guias são $7.0\text{ }\mu\text{m}$ e $5.0\text{ }\mu\text{m}$. As tolerâncias são demasiado severas.

Divergência das frentes de onda A largura de $150\text{ }\mu\text{m}$ provoca alargamento da frente de onda com 90% da potência no modo fundamental, após propagação em guia altamente multimodo.

Acoplamento entre guias vizinhos Para guias de largura $150\text{ }\mu\text{m}$, a distância de $5\text{ }\mu\text{m}$ é suficiente para considerar o acoplamento desprezável ($k < 10^{-5}\text{ cm}^{-1}$).

Capítulo 3

Projecto de Combinadores em Óptica Integrada

Com as funções optimizadas descritas na secção 2.4, procedeu-se à integração dessas funções para projectar combinadores, usando diferentes esquemas de combinação: combinadores coaxiais, multiaxiais e matriciais.

O desempenho dos combinadores foi simulado numericamente para a banda de observação astronómica J, e foram verificadas tolerâncias de fabricação.

3.1 Combinação Coaxial

A combinação coaxial foi projectada usando junções em Y, devendo ser garantido pelo desenho do combinador que o caminho óptico é equivalente para todos os feixes.

O projecto de combinadores coaxiais obedece aos seguintes princípios gerais:

- Simetria do dispositivo combinador de feixe em relação ao centro
- Replicação de estruturas usadas em combinação de sub-múltiplos do número de feixes a combinar

O segundo princípio só tem sentido para dispositivos de combinação de um número par de feixes.

3.1.1 Combinador de Dois Feixes

O combinador em análise tem como ponto de partida o esquema da figura

3.1. Estão identificadas as funções utilizadas.

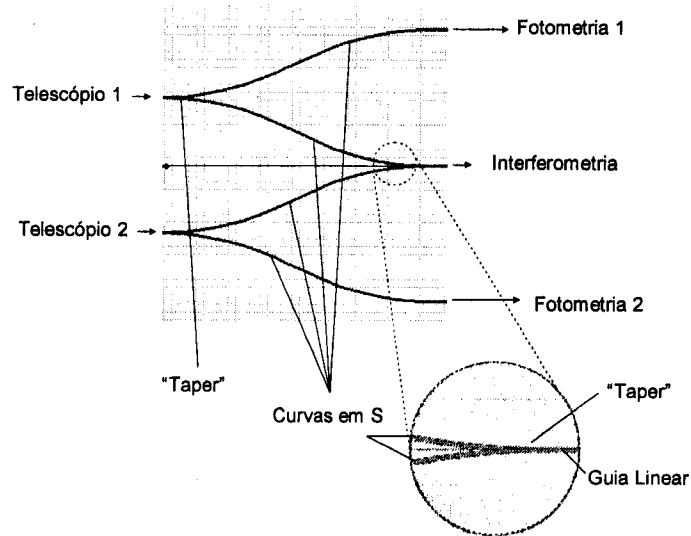


Figura 3.1: Esquema do combinador coaxial de dois feixes.

Todas as funções seguem a otimização para baixa perda de acordo com o estudo de tolerância de funções realizado na secção 2.4. As curvaturas têm parâmetros $c = 2000\mu m$ e $s = 125\mu m$.

Foram fixadas as distâncias entre saídas e entre entradas para o valor estandardizado de $250\mu m$, por razões de alinhamento através de "V-grooves".

i-Desempenho Cromático

A análise em comprimento de onda deste dispositivo não é directa no programa de simulação numérica, uma vez que este não permite variar o índice de refração dos materiais com o comprimento de onda. A estratégia para simular o comportamento cromático dos combinadores consiste em desprezar a dispersão dos materiais e variar o comprimento de onda utilizando o índice do sol-gel para o comprimento de onda $1.3\mu m$. Seguidamente simula-se o combinador nos limites da banda usando os dados da dispersão material ("índices correctos"). Os resultados da simulação numérica apresentam-se na tabela 3.1 e a sua representação no gráfico da figura 3.3.

ii-Largura dos Guias em Canal

A largura dos guias pode não ser realizada experimentalmente exactamente com a mesma largura dos guias na máscara. Por esta razão, simulou-se a influência da largura dos guias nas saídas fotométricas e inter-

$\lambda/\mu m$	P_{int}/P_0	P_{fot}/P_0
1,300	0,473	0,237
1,105	0,468	0,234
1,105*	0,462*	0,231*
1,139	0,469	0,235
1,174	0,470	0,235
1,208	0,471	0,236
1,243	0,472	0,236
1,277	0,473	0,237
1,312	0,474	0,237
1,346	0,475	0,238
1,381	0,475	0,238
1,415	0,476	0,238
1,415*	0,477*	0,239*

Tabela 3.1: Comportamento na banda astronómica J (simulação numérica) de combinador coaxial de dois feixes. Os valores marcados com asterisco incluem dispersão material.

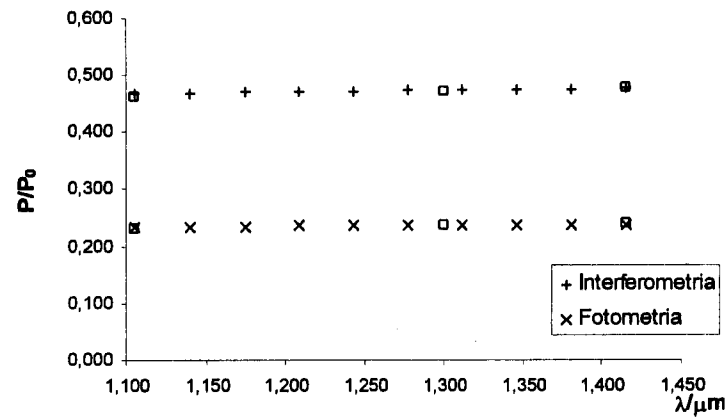


Figura 3.2: Potência nas saídas em função do comprimento de onda. Os valores marcados com quadrado incluem dispersão do material

ferométrica. Os resultados encontram-se na tabela 3.2 e a sua representação no gráfico da figura 3.3.

O comportamento em comprimento de onda demonstra o desempenho acromático do Y e a pouca influência da dispersão material no comportamento do dispositivo.

A simulação numérica do combinador de dois feixes permite verificar

<i>lado</i> / μm	P_{int}/P_0	P_{fot}/P_0
4,0	0,473	0,237
3,0	0,473	0,237
3,2	0,473	0,237
3,4	0,474	0,237
3,7	0,474	0,238
3,9	0,473	0,237
4,1	0,469	0,238
4,3	0,472	0,237
4,6	0,471	0,237
4,8	0,470	0,237
5,0	0,466	0,236

Tabela 3.2: Análise de tolerância do lado (simulação numérica) do combinador coaxial de dois feixes.

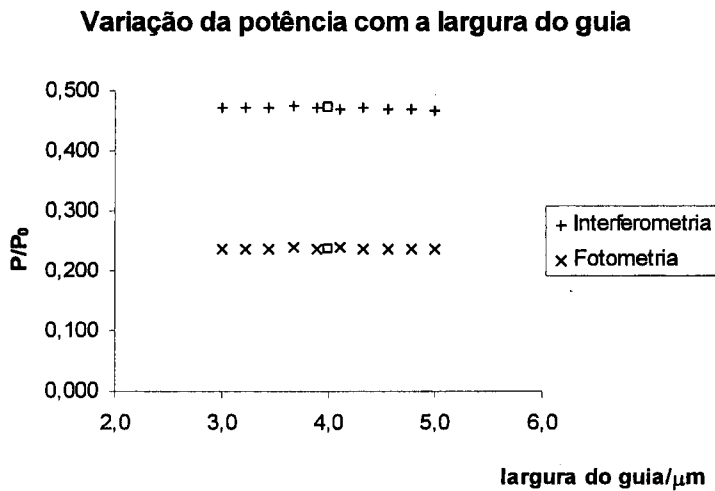


Figura 3.3: Potência nas saídas interferométrica e fotométrica em função do lado do guia quadrado.

que existe elevada tolerância de fabricação. A variação da largura dos guias permite observar que a variação de potência na saída é da ordem de 1%.

Se os campos nas entradas estão em fase, a distribuição de campo no dispositivo é a que está apresentada na figura 3.4. A perda total do dispositivo é de 5.3% (1.0 dB), se as entradas estão em fase.

Se os campos são introduzidos em anti-fase na entrada então é obtido o resultado apresentado na figura 3.5, em que as potências nos braços de fotometria serão novamente de $0.237P_0$ e a saída interferométrica apresenta

valor de campo desprezável ($\sim 10^{-12}P_0$).

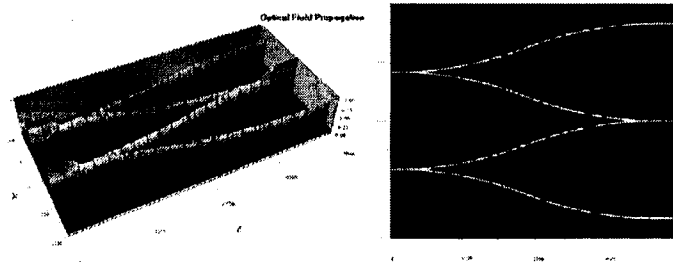


Figura 3.4: Distribuição de amplitude ao longo do combinador para entradas em fase.

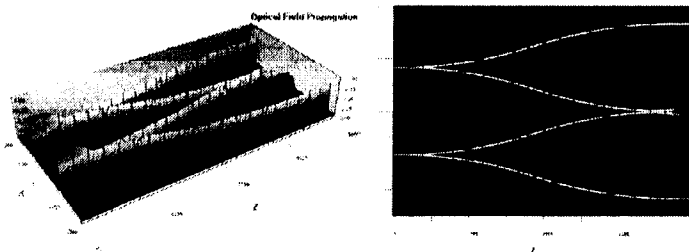


Figura 3.5: Distribuição de amplitude ao longo do combinador para entradas em anti-fase.

Projecto Seleccionado: Combinador Coaxial de 2 Feixes (2TC)

O projecto seleccionado para fabricação do combinador coaxial de dois feixes corresponde ao esquema da figura 3.6. Os parâmetros utilizados para as curvaturas foram $c=2000 \mu m$ e $s=250 \mu m$. As saídas estão desalinhadas de $62.5 \mu m$ relativamente às entradas. A saída total do dispositivo prevista pelo programa de simulação numérica é de 95.5%, incluindo perda de propagação e perda das funções, para o comprimento de onda de $\lambda = 1300 nm$.

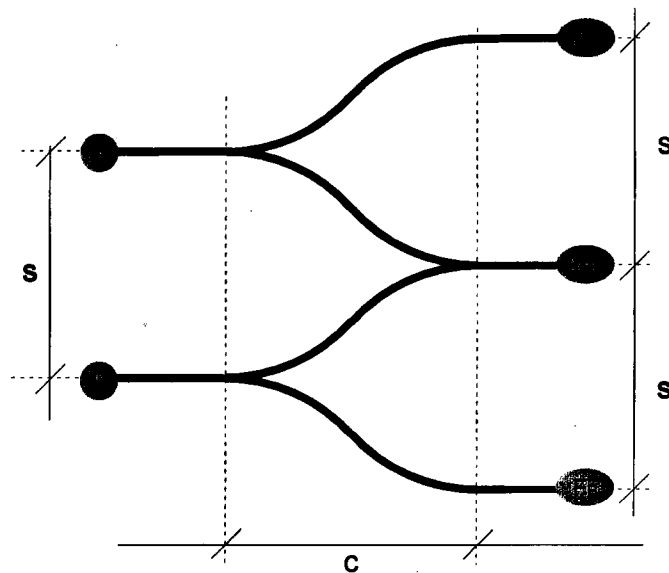


Figura 3.6: Esquema de projecto seleccionado para combinador coaxial de três feixes (2TC): $c=2000 \mu m$; $s=250 \mu m$.

O combinador de dois feixes simulado, para a banda J, apresenta saídas fotométricas com variação de potência de 3.5%, independentemente da fase relativa entre as entradas. A saída interferométrica varia na banda J de 3.2%, para entradas em fase, e é numericamente nula quando as entradas estão em anti-fase.

3.1.2 Combinador de Três Feixes

Novamente foram usadas junções em Y de acordo com a figura 3.7. Todas as dimensões indicadas estão em micrómetros. Os valores dos parâmetros utilizados estão na tabela 3.3.

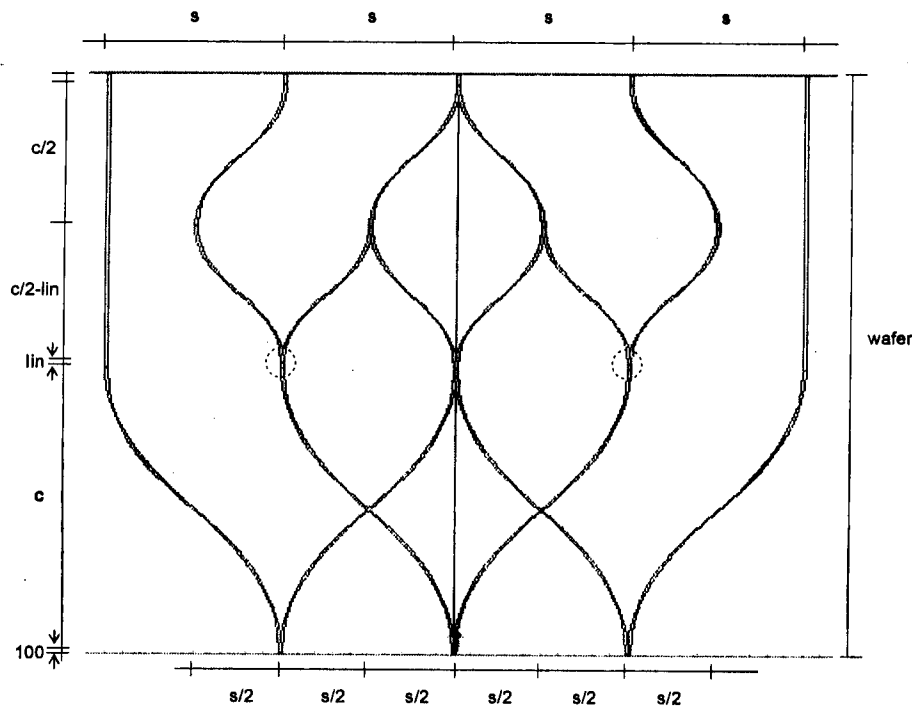


Figura 3.7: Parametrização de um combinador de três feixes. Todas as medidas indicadas estão em micrómetro.

Parâmetro	Valor/ μm
c	4000
s	250
lin	40
wafer	8250

Tabela 3.3: Parâmetros utilizados na simulação numérica do combinador de três feixes.

i-Optimização do Combinador para Equalização Acromática de Caminhos Ópticos

A necessidade de optimização de caminhos ópticos surge do desenho da máscara que, até ao ponto de combinação dos três feixes, faz passar os feixes provenientes dos telescópios 1 e 3 por 4 "tapers", enquanto o feixe do telescópio 2 apenas passará por 3 "tapers". O caminho óptico efectivo será superior para os feixes dos telescópios 3 e 4, pois estes percorrem mais um taper, o que significa que em alguma medida viajam num meio com índice efectivo superior, estando portanto adiantados em fase. A optimização da estrutura do combinador por forma a que todos os caminhos ópticos sejam iguais é conseguida através do ajuste do parâmetro lin evidenciado na figura 3.8. O aumento do parâmetro lin corresponde a um aumento do caminho óptico efectivo do feixe proveniente do telescópio 2. A saída inter-

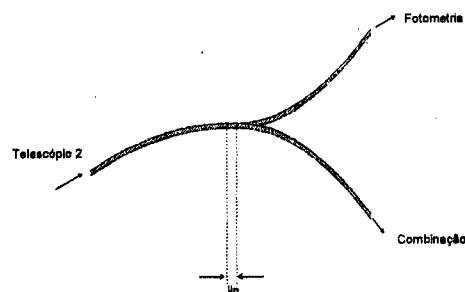


Figura 3.8: Compensação de caminho óptico para o feixe proveniente do telescópio 2.

ferométrica do combinador foi determinada para diferentes valores de ajuste do parâmetro lin através de simulação numérica. Os resultados estão na tabela 3.4 e a representação gráfica na figura 3.9.

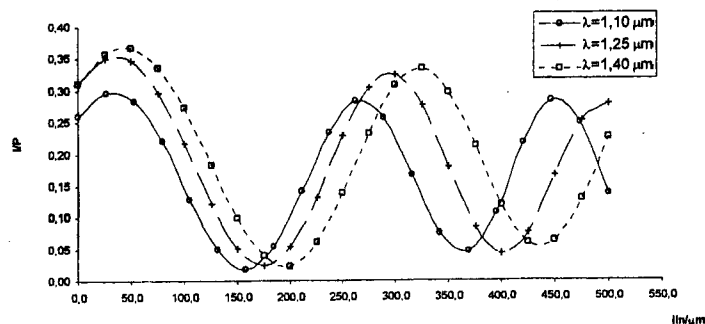


Figura 3.9: Ajuste do parâmetro lin para diferentes comprimentos de onda na banda J.

$lin/\mu m$	P_{int}/P_0 ($\lambda = 1, 10\mu m$)	P_{int}/P_0 ($\lambda = 1, 25\mu m$)	P_{int}/P_0 ($\lambda = 1, 40\mu m$)
0	0,259	0,312	0,311
25	0,297	0,350	0,357
50	0,283	0,347	0,368
75	0,220	0,297	0,336
100	0,129	0,217	0,273
125	0,049	0,122	0,183
150	0,018	0,051	0,098
175	0,054	0,024	0,039
200	0,141	0,054	0,024
225	0,234	0,132	0,061
250	0,283	0,229	0,139
275	0,256	0,304	0,233
300	0,166	0,324	0,308
325	0,074	0,276	0,333
350	0,046	0,179	0,297
375	0,107	0,084	0,212
400	0,187	0,042	0,119
425	0,217	0,076	0,058
450	0,283	0,166	0,062
475	0,248	0,253	0,129
500	0,136	0,277	0,226

Tabela 3.4: Ajuste do parâmetro lin para diferentes comprimentos de onda na banda J.

Os resultados demonstram que existem alguns comprimentos de ajuste do parâmetro que se traduzem num máximo de saída na interferometria. Os máximos de saída em interferometria correspondem à equalização do caminho óptico com diferença de um comprimento de onda entre eles. A escolha do parâmetro de ajuste deve ser aquela em que o caminho óptico seja efectivamente o mesmo, e não que esteja desfasado de um múltiplo inteiro de comprimentos de onda. Este valor de ajuste deve ser válido para todos os comprimentos de onda. Torna-se evidente que o valor a usar deve estar na gama $25 - 75\mu m$. Uma análise do combinador foi então efectuada para um comprimento de onda central da banda J ($\lambda = 1.3\mu m$) com o objectivo de obter ajuste fino do parâmetro lin . O resultado está na tabela 3.5 e a sua representação no gráfico 3.10.

O parâmetro lin óptimo corresponde ao máximo na saída e é aproximadamente $40\mu m$. Este valor foi tomado como um parâmetro fixo nas restantes simulações.

$lin/\mu m$	P_{int}/P_0
10,0	0,342
17,2	0,356
24,4	0,367
31,7	0,373
38,9	0,376
46,1	0,374
53,3	0,369
60,6	0,361
67,8	0,348
75,0	0,331

Tabela 3.5: Ajuste fino do parâmetro lin para $\lambda = 1.3\mu m$.

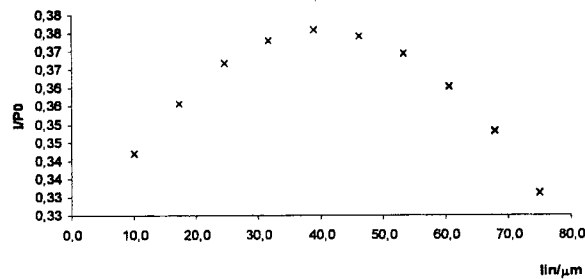


Figura 3.10: Ajuste do parâmetro lin para diferentes comprimentos de onda na banda J.

ii-Desempenho Cromático

A simulação numérica do combinador foi realizada para a banda J sem introduzir dispersão material. O resultado está na tabela 3.6 e a representação no gráfico 3.11.

Os resultados mostram uma variação de 6% entre os extremos da banda, o que é satisfatório tendo em vista os ajustes em comprimento de onda efetuados. As saídas fotométricas têm variações relativas da mesma ordem de grandeza.

iii-Largura dos Guias

A largura dos guias foi variada entre valores de $2.0\mu m$ e $6.0\mu m$, por forma a simular eventuais erros de fabricação na largura dos guias na ordem dos $2.0\mu m$ (a fabricação pode ser realizada com erros muito abaixo deste valor). Os resultados obtidos estão na tabela 3.7 e a sua representação no gráfico 3.12.

Os resultados da simulação numérica mostram que existe alguma tolerância

$\lambda/\mu m$	Fot. 1	Fot. 2a,b	Fot. 3	Int.
1,105	0,150	0,075	0,150	0,320
1.105*	0,152	0,074	0,152	0,362
1,139	0,151	0,069	0,151	0,327
1,174	0,152	0,072	0,152	0,341
1,208	0,153	0,070	0,153	0,353
1,243	0,153	0,076	0,153	0,343
1,277	0,154	0,077	0,154	0,360
1,312	0,154	0,071	0,154	0,380
1,346	0,154	0,068	0,154	0,382
1,381	0,155	0,072	0,155	0,372
1,415	0,155	0,073	0,155	0,382
1,415*	0,153	0,073	0,153	0,365

Tabela 3.6: Resultados de simulação numérica do dispositivo combinador de três feixes para diferentes comprimentos de onda.

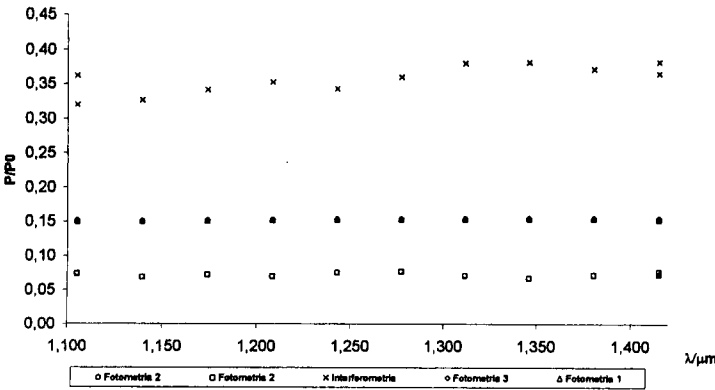


Figura 3.11: Potência nas saídas em função comprimento de onda. Os valores sobrepostos incluem dispersão do material.

na largura dos guias, uma vez que erros de fabricação de $1.0\ \mu m$ se traduzem em termos de saída interferométrica em variações da ordem dos 5%. O resultado mostra ainda que as saídas fotométricas apresentam comportamento mais monótono com a variação da largura dos guias, apresentando uma variação inferior a 5% para variações de largura dos guias de $1.0\ \mu m$.

$\omega/\mu m$	Fot. 1	Fot. 2a,b	Fot. 3	Int.
2,0	0,151	0,049	0,151	0,294
2,4	0,153	0,064	0,153	0,338
2,9	0,154	0,072	0,154	0,374
3,3	0,154	0,075	0,154	0,372
3,8	0,154	0,072	0,154	0,383
4,2	0,153	0,072	0,153	0,353
4,7	0,152	0,066	0,152	0,346
5,1	0,150	0,065	0,150	0,301
5,6	0,147	0,071	0,147	0,324
6,0	0,140	0,035	0,140	0,237

Tabela 3.7: Resultados de simulação numérica de variação da largura dos guias em canal.

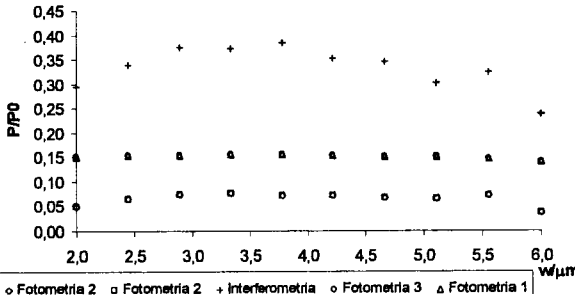


Figura 3.12: Representação dos resultados de simulação numérica de variação da largura dos guias em canal.

Projecto Seleccionado: Combinador Coaxial de 3 Feixes (3TC)

O combinador coaxial de três feixes seleccionado corresponde ao esquema da figura 3.13. Os parâmetros utilizados são: $c=4000\mu m$; $s=250\mu m$ e $lin=40\mu m$. A saída total é de 80,7% incluindo perda de propagação e perda das funções, para o comprimento de onda de $\lambda = 1300nm$.

A análise em comprimento de onda mostra que é possível usar o dispositivo em toda a banda J com diminuição nas saídas de 5%. A análise efectuada tendo em conta a dispersão do material mostra dependência cromática pouco significativa. O combinador de três feixes simulado, para a banda J, apresenta saídas fotométricas com variação de potência de 3.5%, independentemente da fase relativa entre as entradas. A saída interferométrica varia na banda J de 3.2%, para entradas em fase. Para entradas em anti-fase de um par de feixes detecta-se apenas a potência do terceiro feixe nas saídas, em concordância com o resultado obtido para a admissão de luz por cada

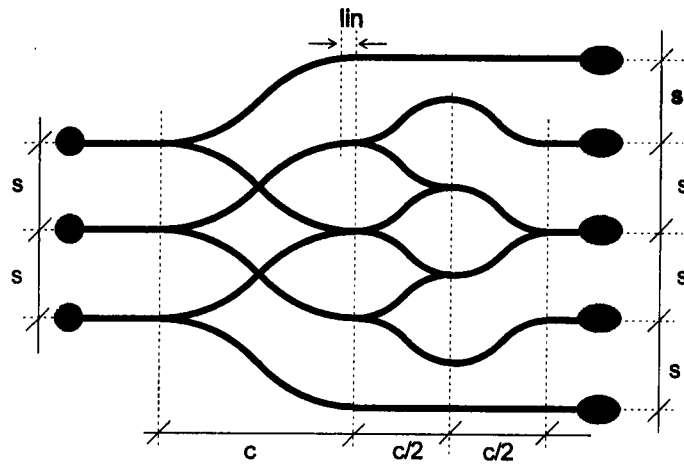


Figura 3.13: Esquema de projecto seleccionado para combinador coaxial de três feixes (3TC): $c=2000\ \mu m$, $s=250\ \mu m$, $lin=40\ \mu m$

entrada.

3.1.3 Combinadores de Mais de Três Feixes

A combinação coaxial de mais de três feixes pode ser conseguida através da aplicação dos princípios de desenho dos combinadores enunciados no início desta secção.

A título de exemplo, considere-se os esquemas de princípio de combinadores de quatro e seis feixes com fotometria, apresentados nas figuras 3.14 e 3.15.

No combinador de 4 feixes da figura 3.14, existe a replicação do combinador de dois feixes duas vezes (linha a tracejado e linha a cheio). Note-se que este combinador pode operar com dois, três ou quatro feixes, com perda associada a um combinador de quatro feixes.

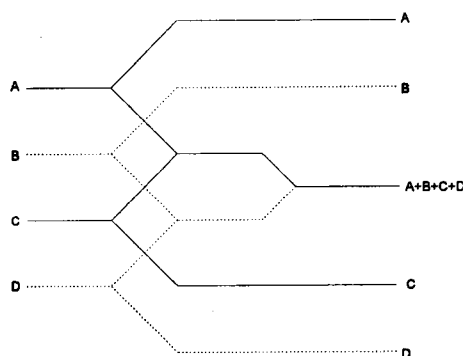


Figura 3.14: Esquema de princípio do combinador de 4 feixes, utilizando junções em Y.

No combinador de 6 feixes da figura 3.15, faz-se numa primeira fase a redução para metade do número de feixes a combinar processando os feixes aos pares, e por fim, replica-se o combinador de três feixes sem interferometria (zona destacada da figura). Note-se que este combinador pode operar com dois, três, quatro, cinco ou seis feixes, com perda associada a um combinador de seis feixes.

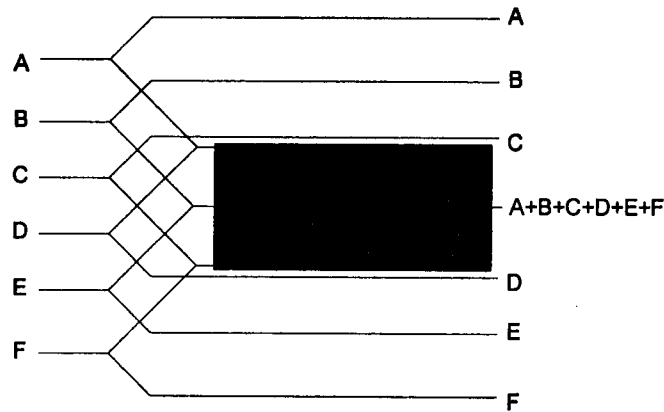


Figura 3.15: Esquema de princípio do combinador de 6 feixes, utilizando junções em Y.

Projecto Seleccionado: Combinador Coaxial de 4 Feixes (4TC)

O combinador coaxial de quatro feixes seleccionado corresponde pa ao esquema da figura 3.16. Os parâmetros utilizados são: $c=4000\ \mu m$ e $s=250\ \mu m$. A saída total é de 85,4% incluindo perda de propagação e perda das funções, para o comprimento de onda de $\lambda = 1300nm$. Este dispositivo foi incluído na fabricação para estender o princípio de combinação a um maior número de feixes, não tendo sido exaustivamente estudado, como sucedeu com os combinadores coaxiais de dois ou três feixes.

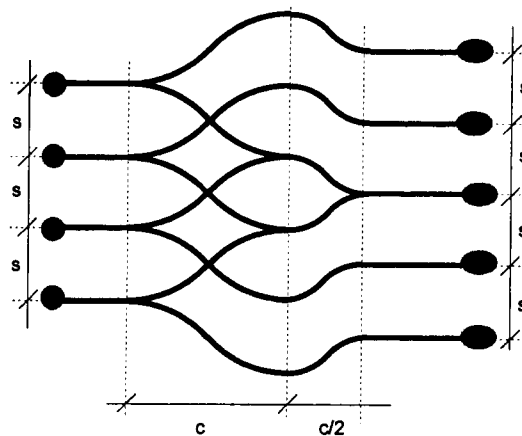


Figura 3.16: Esquema de projecto seleccionado para combinador coaxial de quatro feixes (4TC): $c=4000\ \mu m$, $s=250\ \mu m$

3.2 Combinação Multiaxial

A combinação todos-em-um deve permitir a recuperação de fase em cada linha de base que se pretenda traçar para o conjunto de telescópios que se pretende combinar. A codificação das linhas de base é realizada utilizando a inclinação dos feixes que se faz interferir.

O esquema da zona de combinação multiaxial é o da figura 3.17.

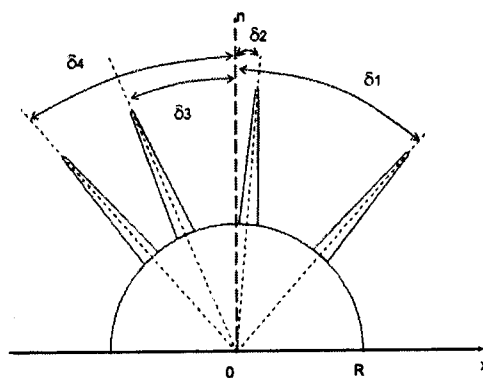


Figura 3.17: Combinação de vários feixes no esquema multiaxial: zona de propagação livre.

São usados "tapers" para expandir adiabaticamente o modo de um guia em canal com núcleo quadrado ($4 \times 4 \mu m^2$) para o modo fundamental de um guia com núcleo de secção rectangular, com altura coincidente com a do guia em canal, mas largura muito superior (tipicamente $4 \times 150 \mu m^2$). O modo fundamental na saída do "taper" é propagado numa região planar (não confinada lateralmente). Os eixos de cada "taper" intersectam-se na origem do plano de interferência. São produzidas franjas de interferência nesse plano, com frequência espacial f_x dependente dos ângulos $\delta_{i,j}$. Ocorre modulação de amplitude de acordo com os perfis dos campos interferentes no plano de interferência.

A largura do "taper" (ω_{taper}) deve ser escolhida de modo a assegurar baixo efeito de difracção na propagação na região planar (verificar o ponto sobre alargamento da frente de onda na secção 2.3). A figura 3.18 ilustra o perfil do modo TE_0 na saída do "taper". O número de franjas resultante depende quer da relação angular entre as ondas interferentes, quer da "largura efectiva" do padrão de interferência.

O afastamento angular entre dois "tapers" adjacentes deve ser superior a um valor tal que, para R seleccionado, não se verifica acoplamento mútuo entre os modos dos "tapers" adjacentes, isto é, respeitar a separação mínima

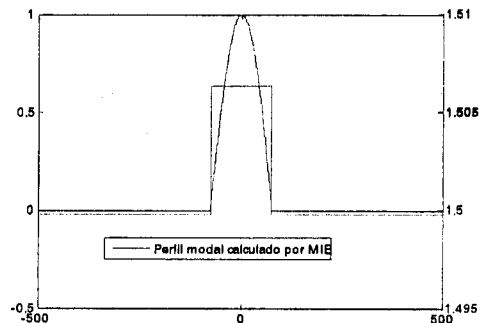


Figura 3.18: Cálculo do modo TE_0 de um guia $4 \times 150 \mu m^2$ com índices de refração típicos da tecnologia utilizada.

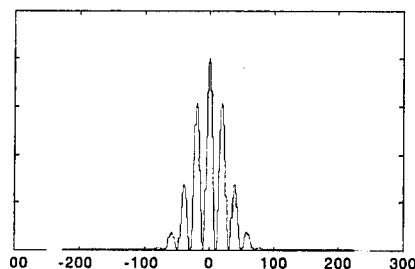


Figura 3.19: Padrão de interferência de duas gaussianas para valores típicos de ângulos.

definida na secção de acoplamento entre guias vizinhos do capítulo 2, secção 2.3. Assim, escolhidos os ângulos δ_i, δ_j das ondas interferentes adjacentes, o valor de R deve ser superior a um mínimo.

O padrão de interferência obtido é do tipo do representado na figura 3.19 para um par de feixes. A existência de propagação na região de propagação livre de ondas TE e TM não deve introduzir efeitos significativos, pois os caminhos ópticos dos vários feixes no dispositivo combinador devem ser perfeitamente equilibrados para obtenção de um "comportamento acromático", e cada polarização produzirá um padrão de interferência com o mesmo centro da outra polarização nessas circunstâncias, a franja central. Para as outras franjas existe dependência do índice efectivo que, na região do guia planar, tem valores próximos para as duas polarizações.

A análise do padrão de interferência de duas ondas (i, j) é facilitada considerando inicialmente o caso de ondas planas monocromáticas (λ_0), propagando-se com ângulos δ_i, δ_j num meio de índice de refração n_{eff} .

Para ângulos $\delta_{i,j}$ pequenos tem-se aproximadamente $\vec{E}_{0i} \sim \|\vec{E}_{0j}\|\hat{x}$; assim, supondo iguais amplitudes escalares U_0 dos dois campos, o campo total no plano de interferência escreve-se na forma da equação 3.1, sendo $k_{ix} = k_i \sin(\delta_i) = k_0 n_{eff} \sin(\delta_i)$ e $k_{jx} = k_j \sin(\delta_j) = k_0 n_{eff} \sin(\delta_j)$:

$$U = U_0 e^{jk_{ix}x} + U_0 e^{jk_{jx}x} \quad (3.1)$$

A distribuição de intensidade será então dada por 3.2:

$$\begin{aligned} I &= U \cdot U^* = 2U_0^2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(e^{jk_{ix}x} + e^{-jk_{ix}x} \right) \right] \\ &= 2U_0^2 [1 + \cos(k_{ix} - k_{jx})x] \\ &= 2U_0^2 \left[1 + \cos \left[n_{eff} \frac{2\pi}{\lambda_0} (\sin \delta_i - \sin \delta_j)x \right] \right] \end{aligned} \quad (3.2)$$

O período das franjas escreve-se:

$$\Lambda_{ij} = \frac{\lambda_0}{n_{eff} |\sin \delta_i - \sin \delta_j|} \quad (3.3)$$

A correspondente frequência espacial $f_{i,j} = 1/\Lambda_{i,j}$ é :

$$f_{ij} = \frac{n_{eff}}{\lambda_0} |\sin \delta_i - \sin \delta_j| \quad (3.4)$$

Usando por simplicidade a notação $\alpha_{i,j} = \sin \delta_{i,j}$ vem:

$$f_{ij} = C' |\alpha_i - \alpha_j|,$$

com $C' = \frac{n_{eff}}{\lambda_0}$.

O princípio fundamental da concepção do combinador multiaxial é a selecção de valores α_k ($k = 1, 2, \dots, N$) tais que resultam frequências f_{ij} , para todas as combinações i, j , com valores distintos. Na situação mais simples, os valores de f_{ij} são múltiplos inteiros de uma frequência mínima f_0 . Interessa, ainda, operar com valores de α_k tais que resulta uma série de valores de f_{ij} o mais compacta possível (ver secção 1.3 sobre combinação coaxial).

3.2.1 Combinador de Dois Feixes

Os parâmetros típicos da frequência de base para a codificação podem ser calculados a partir da resolução mínima do detector para que as franjas sejam correctamente medidas. Se o espaçamento entre pixels é de d_{pixel} ,

então deve-se garantir que dois pixels medem, na pior das hipóteses, o valor máximo e o valor mínimo de intensidade, isto é, estão espaçados de meio comprimento de onda das franjas: $\frac{\Lambda_{min}}{2} = d_{pixel}$; então a frequência de codificação máxima será

$$f_{max} = \frac{1}{\Lambda_{min}} = \frac{1}{2d_{pixel}}$$

Se o combinador é simétrico, então os ângulos de codificação apresentam valores simétricos, $\pm\delta$. A substituição na equação 3.3 resulta em ($n_{eff} = 1.5$, $\lambda_0 = 1.3\mu m$) $\delta = 1.24^\circ$, para $d_{pixel} = 10\mu m$.

O combinador multiaxial de dois feixes pode ser implementado utilizando as funções optimizadas na secção 2.4, nomeadamente as considerações sobre o "taper" linear, limitação do acoplamento entre guias vizinhos e propagação livre.

As entradas são separadas de múltiplos de $sep = 250\mu m$. A largura dos "tapers" é $4.0\mu m$ à entrada e $150\mu m$ à saída; o comprimento de cada "taper" é de $1.0cm$, segundo o seu eixo. A separação entre as saídas dos "tapers" é de $5\mu m$ por forma a evitar efeitos de acoplamento entre os feixes.

Por análise dos resultados de simulação numérica, verificou-se que a existência de uma curvatura em S, antes da entrada dos feixes na zona de alargamento ("taper"), provoca deformação da frente de onda. A observação das frentes de onda após a curvatura em S produziu os resultados da figura 3.20:

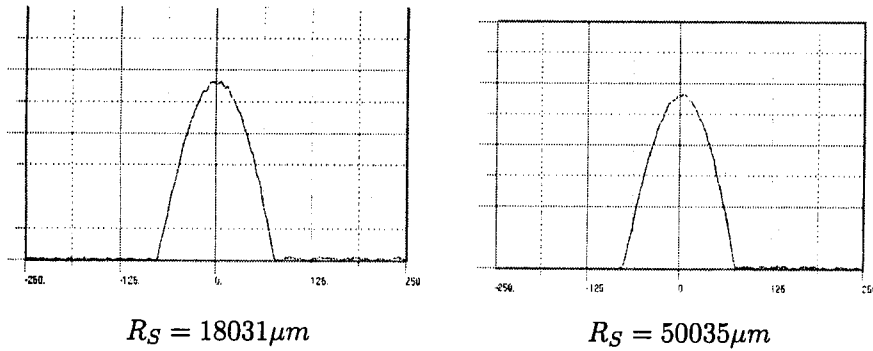


Figura 3.20: Deformação da frente de onda por introdução de curvatura antes do "taper", para dois valores de raio da curvatura em S.

Foi testado o efeito de introdução de um guia linear entre a curvatura em S e o "taper", verificando-se que mesmo para comprimentos de guia linear (L) elevados ($\sim 1cm$) a filtragem introduzida não é significativa, e os resultados são semelhantes. A introdução de guia linear antes do "taper" tem

resultados pouco significativos, mas irá ser usada para garantir a filtragem de modos de ordem superior ao fundamental no "taper" (figura 3.21).

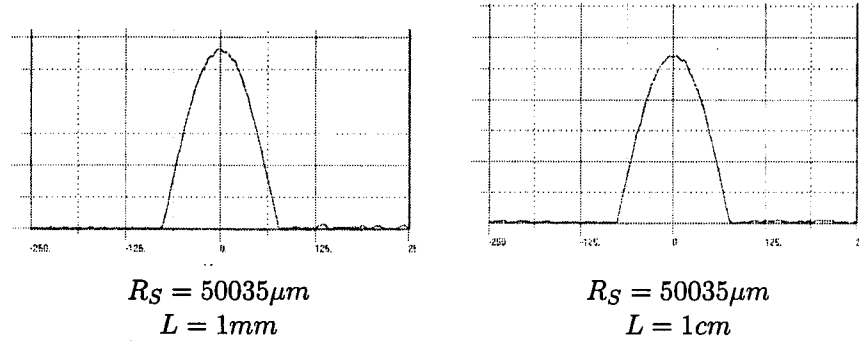


Figura 3.21: Efeito da introdução de guia de onda linear entre a curvatura e o "taper".

A existência de deformação na frente de onda por introdução de curvatura em S não é filtrada significativamente pela introdução de guia linear na entrada do "taper" adiabático; a variação de 1 mm para 1 cm não provoca alterações significativas em termos de deformação da frente de onda. A variação do raio de curvatura na entrada do "taper" reduz a deformação da frente de onda de forma mais eficaz que a introdução de guia linear, mas ainda assim sem efeitos de anulamento deste efeito. Para o desenho dos combinadores são usados raios de curvatura superiores a $50000\mu m$ e um guia linear de $1000\mu m$ antes dos "tapers" adiabáticos.

Assim, o projecto de combinador multiaxial de dois feixes utiliza os seguintes valores para os parâmetros (figura 3.22): as entradas estão separadas de $sep = 750\mu m$; a largura dos "tapers" é $4.0\mu m$ à entrada e $150\mu m$ à saída; o comprimento de cada "taper" é de $1.0cm$, segundo o seu eixo; a separação entre as saídas dos "tapers" é de $5\mu m$; os parâmetros c e s da figura são definidos de forma que o feixe de cada telescópio seja guiado sem perda nem deformação significativa da frente de onda, isto é, com raio superior a $50000\mu m$ e os ângulos para os "tapers" são $\delta = \pm 1.24^\circ$.

A distribuição de amplitude ao longo do dispositivo está representada na figura 3.23 e o interferograma gerado no final da zona de propagação livre nos gráficos da figura 3.24, em que foi variado o comprimento de onda λ_0 .

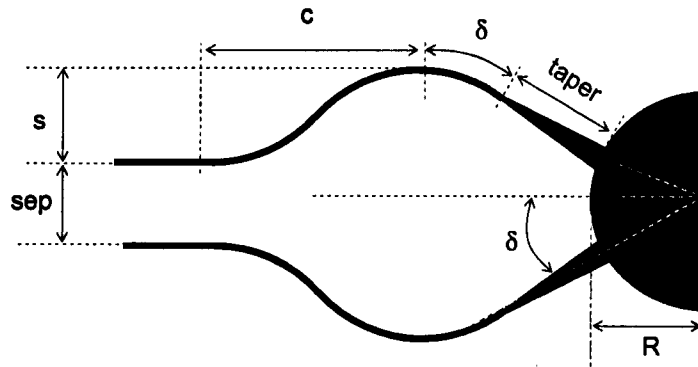


Figura 3.22: Parametrização do combinador multiaxial de 2 feixes.

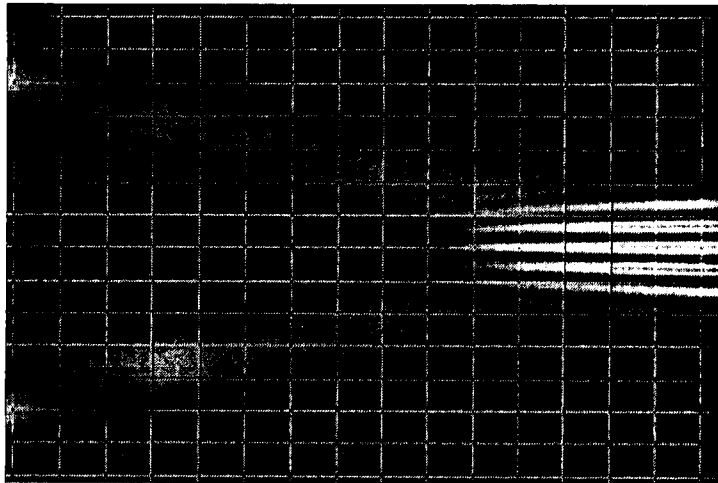


Figura 3.23: Distribuição de amplitude na zona final do combinador multiaxial de dois feixes.

3.2.2 Combinador de Três Feixes

Um combinador multiaxial de três feixes requer um projecto mais elaborado que o combinador de dois feixes. A figura 3.25 mostra a nomenclatura utilizada ($\delta_1 > 0$; $\delta_2, \delta_3 < 0$)

A escolha de três ângulos ($\delta_1, \delta_2, \delta_3$) corresponde à escolha dos parâmetros α_k tais que:

$$\begin{aligned} C'|\alpha_2 - \alpha_3| &= 1f_0 \\ C'|\alpha_1 - \alpha_2| &= 2f_0 \\ C'|\alpha_1 - \alpha_3| &= 3f_0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Ou seja, sendo $C = f_0/C'$:

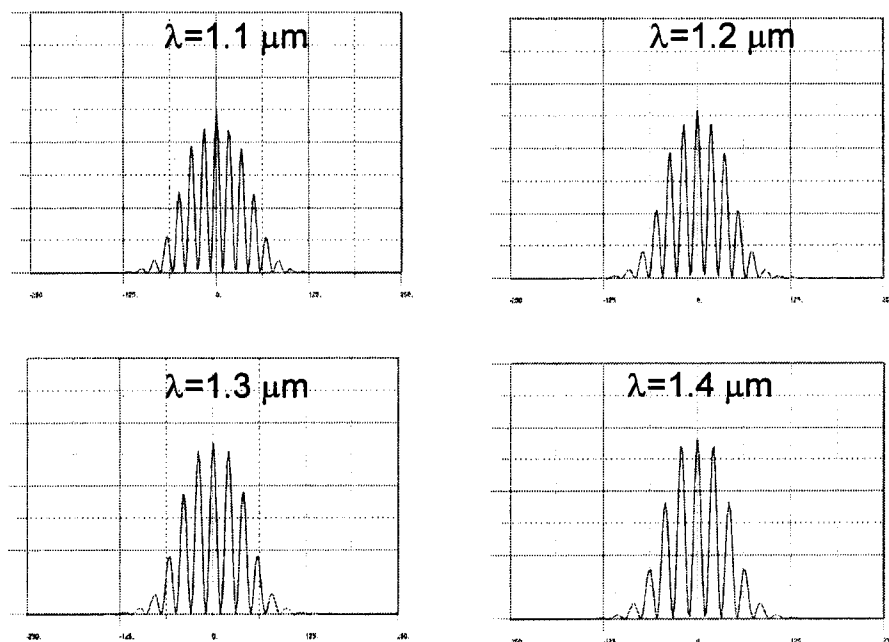


Figura 3.24: Interferograma gerado na zona de propagação livre de combinador multiaxial de dois feixes para diferentes comprimentos de onda da banda J.

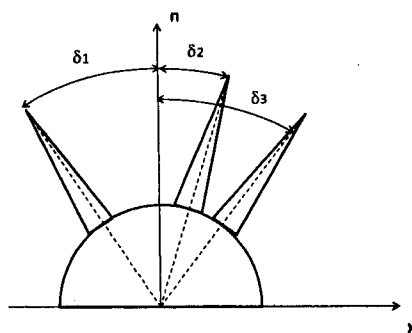


Figura 3.25: Representação esquemática da zona de propagação livre do combinador multiaxial de três feixes.

$$\begin{aligned}\alpha_2 - \alpha_3 &= C \\ \alpha_1 - \alpha_2 &= 2C \\ \alpha_1 - \alpha_3 &= 3C\end{aligned}\tag{3.6}$$

O sistema de equações 3.6 não permite extrair uma solução única. É necessário introduzir informação adicional. Uma possibilidade é estabelecer que os ângulos $|\delta_1|$ e $|\delta_3|$ são iguais, ou seja, todas as ondas planas interferentes se situam numa abertura angular simétrica. Para um sistema de N feixes este princípio é generalizado usando os ângulos de índices limite.

Usando o critério de simetria obtém-se $\alpha_1 = -\alpha_3$ e resulta:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{3}{2}C = \frac{3}{2}\frac{\lambda_0}{n_{eff}}f_0 \\ \alpha_2 &= -\frac{1}{2}C = -\frac{1}{2}\frac{\lambda_0}{n_{eff}}f_0 \\ \alpha_3 &= -\frac{3}{2}C = -\frac{3}{2}\frac{\lambda_0}{n_{eff}}f_0\end{aligned}\quad (3.7)$$

que, em termos de δ , se escreve:

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \arcsin\left[\frac{3}{2}\frac{\lambda_0}{n_{eff}}f_0\right] \\ \delta_2 &= -\arcsin\left[\frac{1}{2}\frac{\lambda_0}{n_{eff}}f_0\right] \\ \delta_3 &= -\arcsin\left[\frac{3}{2}\frac{\lambda_0}{n_{eff}}f_0\right]\end{aligned}\quad (3.8)$$

Existe dependência dos valores de δ_k na escolha de f_0 . Nas condições indicadas para a parametrização do combinador de dois feixes, $d_{pixel} = 15\mu m$, $n_{eff} = 1.5$ e $\lambda_0 = 1.3\mu m$, o que resulta em $\delta_1 = -\delta_3 = 2.484^\circ$ e $\delta_2 = 0.828^\circ$.

A escolha do valor de f_0 (frequência espacial mínima do padrão de interferência), determina uma escala para os valores de α_k . A análise mais detalhada do padrão de interferência resultante dos campos propagados a partir dos "tapers" permite estabelecer valores mínimos aceitáveis para f_0 .

Para os "tapers" utilizados no projecto existe uma função gaussiana que se aproxima de forma bastante razoável do modo na zona final do taper. A análise de Fourier do interferograma gerado pela sobreposição das gaussianas deve permitir recuperar as frequências de codificação utilizadas.

O resultado da sobreposição de duas gaussianas é dado por 3.9, em que $G(x) = U_0 e^{-\pi(ax)^2}$:

$$I(x) = 2 \times G(x)^2 [1 + \cos[(k_{ix} - k_{jx})x]] \quad (3.9)$$

Usando transformada de Fourier (representada por $\mathcal{F}$), resulta um espectro do padrão de interferência dado por:

$$\tilde{I}(f_x) = \mathcal{F}[2G(x)^2] + \mathcal{F}[G(x)^2 (e^{j2\pi f_{ix}x} + e^{-j2\pi f_{jx}x})]$$

$$= \mathcal{F} [2G(x)^2] + \mathcal{F} [2G(x)^2] \otimes [\delta_{(f_x - f_{ij})} + \delta_{(f_x + f_{ij})}] .$$

Sendo

$$\mathcal{F} [2G(x)^2] = 2U_0 \mathcal{F} [e^{-\pi(\sqrt{2}ax)^2}] = 2U_0 \left[\frac{1}{\sqrt{2}a} e^{-\pi\left(\frac{f_x}{\sqrt{2}a}\right)^2} \right]$$

A representação deste espectro encontra-se na figura 3.26. A largura de cada função gaussiana do espectro é $4a$, pelo que as frequências de codificação devem estar espaçadas pela quantidade $4a$.

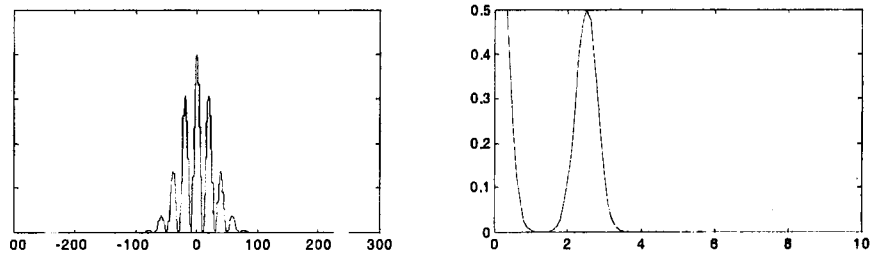


Figura 3.26: Espectro obtido pela transformada de Fourier do interferograma de duas ondas colimadas gaussianas.

A frequência máxima de leitura que ocorre num combinador multiaxial deve relacionar-se com a dimensão do pixel de leitura pela expressão

$$f_{ijmax} = \frac{1}{2d_{pixel}} \quad (3.10)$$

Sendo usado um sistema óptico de formação de imagem do padrão de interferência sobre um sensor CCD arrefecido, com uma ampliação transversal M_T , o valor mínimo para a distância entre pixels no CCD está relacionado com a frequência máxima de codificação por

$$f_{ijmax} = \frac{M_T}{2d_{pixelCCD}}$$

Para o projecto do combinador multiaxial de três feixes foram tomados os ângulos calculados anteriormente, verificando-se que não existe sobreposição das funções gaussianas do espectro de Fourier.

A parte mais complexa do projecto do dispositivo não é impor os ângulos calculados por esta técnica para os feixes que interferem, mas igualizar os caminhos ópticos para todos os feixes.

Para este efeito foi produzido um código em MatLab que, partindo de

uma configuração de entradas previamente definida, igualiza os caminhos geométricos até uma margem de erro previamente definida. O código posiciona as entradas das curvaturas em S (parâmetro L da figura 3.27) de forma a obter o mesmo caminho geométrico para os feixes procedentes de todos os telescópios, até ao ponto central da zona de interferência. Impondo estas condições, é ainda possível calcular comprimentos de guias lineares que igualem os caminhos geométricos para todos os feixes, com raios das curvaturas em S acima do limite de $50000\mu m$. A configuração final foi escolhida através da análise dos raios de curvatura que mais se aproximam de $50000\mu m$.

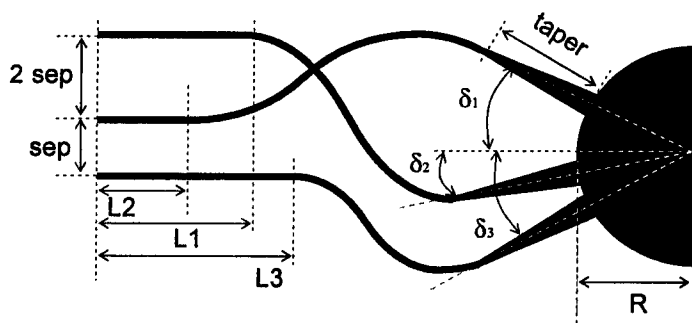


Figura 3.27: Parametrização do combinador de três feixes.

O projecto do dispositivo é feito desde a zona das franjas até à admissão dos feixes ao combinador, usando a posição transversal das entradas como parâmetros variáveis em múltiplos de $250\mu m$ (separação conseguida entre fibras com *v-grooves*). As entradas estão posicionadas em $125\mu m$, $-625\mu m$ e $-125\mu m$, para os telescópios 1, 2 e 3, respectivamente.

A distribuição de amplitude ao longo do dispositivo está ilustrada na figura 3.28.

A análise em comprimento de onda produziu os interferogramas da figura 3.29.

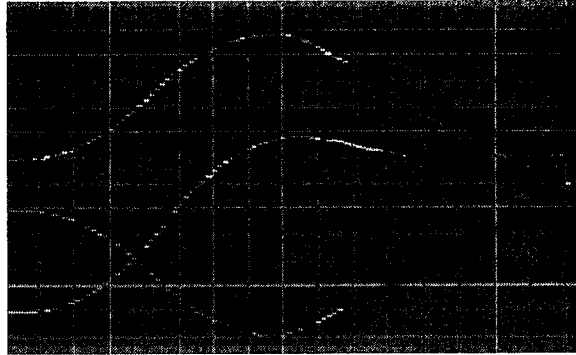


Figura 3.28: Distribuição de amplitude em combinador multiaxial de três feixes.

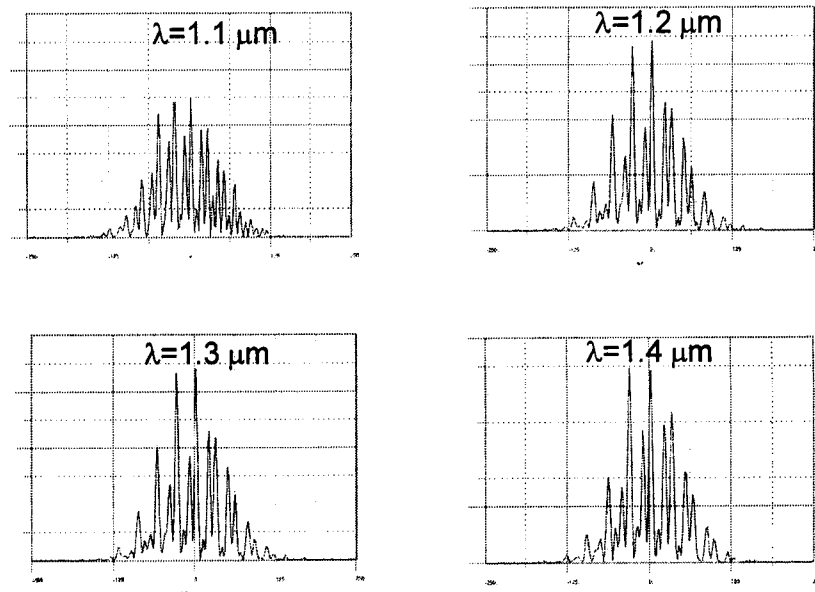


Figura 3.29: Interferograma gerado na face de saída da zona de propagação livre do combinador multiaxial de três feixes para diferentes comprimentos de onda na banda J.

3.2.3 Combinadores de mais de Três Feixes

A combinação multiaxial de mais de três feixes pode ser implementada usando o algoritmo que foi utilizado para combinação multiaxial de três feixes, devidamente adaptado.

Com o número crescente de feixes a combinar é relevante estudar com de-

talhe a posição das admissões dos feixes ao combinador, por forma a efectuar uma igualização grosseira de comprimento para cada feixe até à ordem das dezenas de micrómetro, o que vai implicar diminuição dos raios de curvatura das curvaturas em S de entrada. A compensação do caminho geométrico é realizada através da introdução de curvaturas em S, ajustadas até que o caminho óptico seja equivalente para todos os feixes.

3.3 Conclusões

O projecto de combinadores em óptica integrada pode ser realizado usando as configurações coaxial, multiaxial e matricial. Foram projectados combinadores nas duas primeiras configurações.

Combinação Coaxial O projecto de combinadores coaxiais é o mais simples e com maior reprodutibilidade em termos de estrutura. Os combinadores são projectados com distância entre entradas e entre saídas de $250\ \mu m$, por motivos de alinhamento, usando "V-grooves". A análise de tolerância dos combinadores coaxiais demonstram tolerância dentro dos parâmetros de fabricação típicos da tecnologia sol-gel híbrido. Os combinadores coaxiais seleccionados foram o combinador coaxial de dois feixes (2TC), coaxial de três feixes (3TC) e coaxial de quatro feixes (4TC). Os projectos estão ilustrados na figura 3.30.

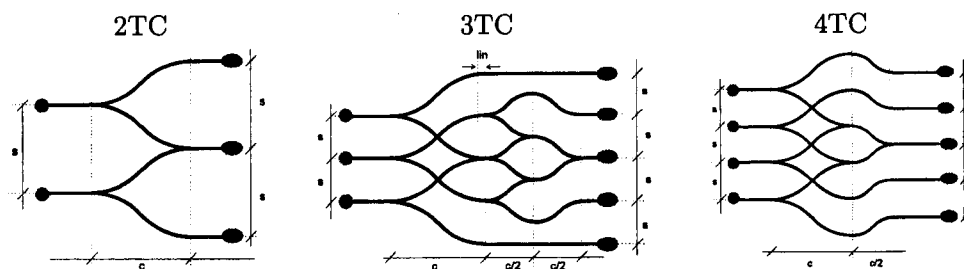


Figura 3.30: Projectos seleccionados de combinadores coaxiais.

A implementação destes combinadores para obtenção do interferograma implica a existência de moduladores, tal como definido na secção 1.3.

Combinação Multiaxial A combinação multiaxial de feixes implica uma zona de interferência onde são introduzidos os feixes previamente alargados adiabaticamente. Os ângulos de interferência são dados por um algoritmo que implica conhecimento do período mínimo das franjas pretendidas. Para o combinador de dois feixes foram determinados os ângulos $\delta_1 = \delta_2 = 1.24^\circ$. Para o combinador de três feixes foram determinados os ângulos $\delta_1 = 2.484^\circ$, $\delta_2 = 0.828^\circ$, $\delta_3 = -2.484^\circ$ e foi desenvolvido um código em MatLab para igualização do caminho óptico de todos os feixes.

Os combinadores são projectados com distâncias entre entradas múltiplas de $250\ \mu m$, tal como nos combinadores coaxiais.

A análise cromática dos combinadores multiaxiais demonstra que, em diferentes comprimentos de onda, o interferograma gerado é alterado de acordo com a expressão 3.3. Os combinadores multiaxiais seleccionados foram o combinador multiaxial de dois feixes (2TM) e multiaxial de três feixes (3TM). Os projectos estão representados na figura 3.31.

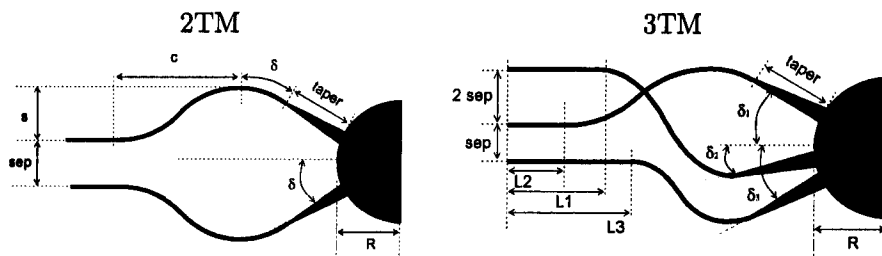


Figura 3.31: Projectos seleccionados de combinadores multiaxiais.

A implementação destes combinadores para a obtenção do interferograma não implica a existência de moduladores, tal como definido na secção 1.3.

Capítulo 4

Fabricação de Combinadores em Óptica Integrada

Foi utilizada tecnologia sol-gel híbrido para fabricação de dispositivos combinadores de feixe. A técnica de fabricação utilizada encontra-se detalhada na referência [17], pelo que apenas se apresenta uma descrição geral dessa tecnologia e se referem alternativas de fabricação. São apresentados resultados de fabricação de combinadores coaxiais e multiaxiais, usando a tecnologia sol-gel híbrido, com os valores dos parâmetros de fabricação utilizados.

4.1 Tecnologias de Fabricação de Dispositivos em Óptica Integrada

4.1.1 Tecnologia Sol-Gel Híbrido

A tecnologia sol-gel híbrido baseia-se na produção de materiais que podem ser descritos como uma matriz de sol-gel em que é introduzida dopagem por um material inorgânico, para controlar o seu índice de refração. Esta tecnologia encontra-se descrita em detalhe em [17]. A tecnologia implementada utiliza n-tetrapropóxido de zircónio (TPZ), metacriloxipropiltrimetoxissilano (MAPTMS), ácido metacrílico (MAA), Etanol (EtOH) e solução de ácido clorídrico ($\text{HCl } 0.1 \text{ mol.dm}^{-3}$).

A matriz de sol-gel é produzida a partir do MAPTMS; a função de ácido MAA é estabilizar o TPZ, que é a fase inorgânica que controla o índice de refração do material. São usados o EtOH e o HCl para ajustar as propriedades de viscosidade e miscibilidade dos reagentes.

A solução de sol-gel pode ser preparada com várias concentrações de óxido de zircónio variando as proporções de reagentes, e obtendo assim

soluções que possibilitam a fabricação de filmes com índices de refração diferentes, de acordo com a tabela 4.1.

%Zr	n_{633nm}	n_{1302nm}	n_{1553nm}
5%	1.5026	1.4920	1.4901
10%	1.5039	1.4928	1.4908
20%	1.5116	1.4998	1.4976
30%	1.5211	1.5096	1.5076
40%	1.5246	1.5127	1.5107

Tabela 4.1: Índice de refração do material sol-gel com várias concentrações de óxido de zircónio, para vários comprimentos de onda.

Para produzir um qualquer dispositivo funcional é seguido um procedimento semelhante, descrito com pormenor no Anexo C, com adaptação dos volumes a usar de acordo com a percentagem desejada de óxido de zircónio.

A tecnologia sol-gel é utilizada como base para a produção de dispositivos, uma vez que os filmes podem ser bem caracterizados e as técnicas de fabricação estão parametrizadas. A principal limitação da tecnologia sol-gel hidrolítico está na absorção que o material resultante apresenta na banda J (figura 4.1), que, sendo conhecida de antemão, pode ser considerada na análise do desempenho do dispositivo para a banda de observação astronómica J.

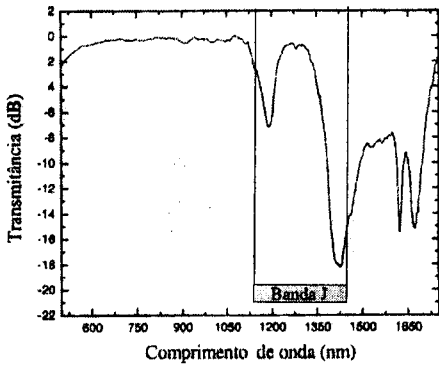


Figura 4.1: Transmitância de guia de sol-gel híbrido [17]. A barra assinala os comprimentos de onda da banda de observação astronómica J.

Existe a possibilidade de utilizar filmes de sol-gel para fabricar guias em canal por escrita directa sobre o filme produzido, através de uma unidade de escrita directa, não usando os processos fotolitográficos descritos na secção 4.2. A unidade de escrita directa adquire dados dos guias a marcar no filme

e faz exposição apenas das zonas que serão usadas como guias de onda. A revelação é feita com etanol.

Até à data de escrita desta dissertação a unidade de escrita directa em desenvolvimento no Departamento de Física da FCUP apresenta algumas limitações, na escrita directa sobre sol-gel, nomeadamente na largura dos guias que pode produzir (acima do regime monomodo pretendido) e no perfil dos guias que, em algumas situações, têm a forma trapezoidal. A unidade de escrita directa foi redireccionada para produção de máscaras sobre placas fotosensíveis que são replicadas como máscaras e a partir das quais são fabricados os dispositivos pretendidos.

A descrição detalhada do procedimento de preparação da solução de sol-gel encontra-se no Anexo C.

4.1.2 Alternativas à Tecnologia Sol-Gel Híbrido

Foram estudadas, em termos gerais, alternativas à fabricação de dispositivos em tecnologia sol-gel que, contudo não foram usadas experimentalmente. Nesta dissertação trata-se apenas de combinadores em óptica integrada fabricados em tecnologia sol-gel híbrido, mas qualquer tecnologia que permita obter elementos ópticos integrados análogos será equivalente em termos de desenho dos combinadores. Duas tecnologias alternativas e viáveis para substituição da tecnologia sol-gel híbrido merecem uma curta referência: polímeros, permuta iónica, que recorrem a infraestruturas de microfabricação relativamente simples. É ainda referida a tecnologia de sílica sobre silício.

i- Polímeros

A tecnologia mais próxima da tecnologia sol-gel é a de polímeros [9], que consiste na utilização de polímeros para construção dos guias em canal, por fotopolimerização (processo bastante semelhante ao que é realizado com sol-gel).

Existem vários polímeros e resinas epóxicas disponíveis comercialmente, entre as quais se destaca o PMMA (polimetilmetaacrilato), que podem ser tomados como substitutos directos para o material sol-gel da técnica que vai ser utilizada.

As propriedades do PMMA são enumeradas em [9]. A tecnologia apresenta possibilidade de controlo do índice por exposição a radiação UV, tal como a tecnologia sol-gel. As propriedades geométricas dos guias são controladas pelos mecanismos utilizados em tecnologia sol-gel: máscara de amplitude após deposição de filme com espessura determinada. A principal

desvantagem da tecnologia de polímeros face à tecnologia sol-gel encontra-se no custo de polímeros com excelente transparência na região de interesse, e eventualmente na estabilidade térmica, para lá da pouca experiência na sua implementação na unidade de investigação.

Tal como na tecnologia sol-gel, existem limitações de fabricação controlada e de resistência térmica e mecânica de dispositivos fabricados nesta tecnologia.

ii- Permuta Iónica

Tem interesse mencionar esta tecnologia apenas num contexto histórico, uma vez que os primeiros combinadores em óptica integrada [12] foram realizados com permuta iónica de sódio-potássio e sódio-prata.

A técnica consiste em fazer a permuta de iões sódio de um substrato de vidro através de um processo de difusão de iões, provenientes da fusão de sais (potássio ou prata são os iões mais comuns). A estrutura tridimensional é obtida através de difusão através de uma máscara, que apenas expõe parte do material à permuta iónica. Nas zonas expostas aumenta o índice de refração do vidro, constituindo-se desta forma guias em canal. Para se obter um perfil modal adequado pode fazer-se migrar os guias em canal para o interior do vidro por acção de um campo eléctrico externo ou efectuar uma segunda difusão [15].

No Departamento de Física da FCUP esta técnica foi estudada experimentalmente para produção de guias de onda integrados, mas neste momento o processo de fabricação não é utilizado. Esta técnica não vai ser usada, a curto prazo, para produção de dispositivos combinadores de feixe.

iii- Sílica-Sobre-Silício

Dado o muito baixo fluxo de fotões disponível para o processamento interferométrico, é fundamental operar com sistemas com a mínima perda possível. A tecnologia de óptica integrada em sílica sobre silício [11], permite a construção de combinadores com bom desempenho [12]. A tecnologia é mais complexa e recorre a infraestruturas significativas, nomeadamente porque se utilizam técnicas como FHD, PECVD e RIE [18]; todavia, o custo final de produção de um reduzido número de dispositivos combinadores não deverá constituir um obstáculo, tendo presente o sistema interferométrico global em causa.

Poderá afirmar-se, em termos genéricos, que o projecto de dispositivos em sílica-sobre-silício não se afasta drasticamente do que é efectuado usando os parâmetros da tecnologia de sol-gel híbrido; assim, esta permite a

abordagem de problemas associados à implementação de combinadores em Óptica Integrada de um modo suficientemente geral.

4.2 Aspectos Práticos da Fabricação de Dispositivos em Óptica Integrada

Existem alguns aspectos práticos na produção de dispositivos combinadores de feixe em óptica integrada que interessa realçar. Para produzir um dispositivo em tecnologia sol-gel, segue-se as etapas indicadas na figura 4.2.

A maior parte da fabricação é feita em sala limpa, isto é, num laboratório com condições especiais para efectuar a fabricação de dispositivos em óptica integrada. A sala limpa do DF-UOSE disponibiliza várias facilidades e equipamentos para micro-fabricação, como água filtrada e desionizada, ar comprimido filtrado, banho de ultra-sons, microscópio óptico com câmara digital incorporada, perfilómetro, equipamento de deposição de filmes que permite rotação controlada ("spin-coater"), evaporador de metais, entre outros. Para trabalhar neste laboratório utiliza-se material e equipamentos adequados (que libertam um mínimo de partículas que contaminariam os reagentes, soluções a depositar e filmes depositados). Na sala limpa é sempre usado fato de protecção, touca, luvas e protecção para os sapatos.

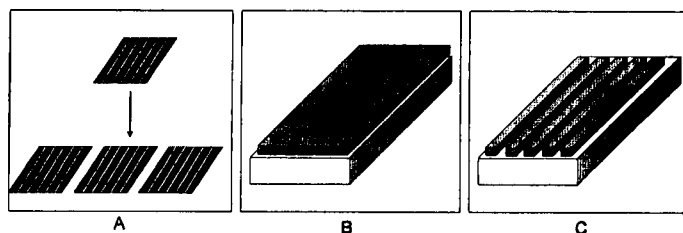


Figura 4.2: Passos fundamentais de produção de dispositivos em sol-gel (descrição no texto).

A- Replicação de Máscaras

Foi projectada uma máscara, escrita com feixe de electrões na Universidade de Glasgow, e que necessita ser replicada como garantia de preservação do original adquirido. Algumas máscaras foram ainda produzidas com a unidade de escrita directa, que necessitam de ser replicadas pois o suporte onde são gravadas não resiste à exposição no laser de excímeros.

Os detalhes usados na replicação de máscaras encontram-se no anexo C.

A replicação de uma máscara é realizada usando um substrato de sílica, cuidadosamente lavado e seco. Os substratos são cortados com o comprimento de 4.7 cm por razões de processamento no alinhador de máscaras. A deposição de um filme metálico de níquel-crómio, sobre os substratos de sílica, é realizada num evaporador térmico à taxa de 0.2 nm/s até à espessura (medida no evaporador) de 75 nm.

Depois de depositar o filme metálico no evaporador, faz-se a deposição de um verniz fotossensível (photoresist S1818) por "spin-coating" a 3000 rpm, durante 1 minuto. A amostra é seguidamente submetida a uma pré-cura a 90°C durante 30 min, usando o forno.

Segue-se a exposição da amostra à radiação ultravioleta, no alinhador de máscaras. A máscara original é primeiramente posicionada e só depois se procede à colocação da amostra a expor, em contacto com a máscara original. A superfície da máscara e a superfície com verniz fotossensível ficam em contacto. A exposição é realizada durante cerca de 20 s, usando o comprimento de onda $\lambda = 435$ nm, com 1 mJ/cm^2 .

Procede-se à revelação com solução de revelador (solução *developer* 315 e água [1:2 (v/v)]). A amostra revelada é lavada com água corrente e seca com ar comprimido filtrado. Após pré-cozedura da amostra durante 15 minutos a 120°C, realiza-se a remoção do filme de níquel-crómio com uma solução de duas partes de ácido clorídrico (HCl 98%) e água (2:1 v/v). A amostra é então limpa com água corrente.

A remoção do filme de photoresist é realizada com acetona. A máscara obtida é lavada e seca cuidadosamente. São observados os resultados ao microscópio óptico.

Para aumentar a resistência do filme metálico à exposição que terá no laser de excímeros, faz-se um tratamento térmico com a "hot-plate", durante 30 minutos, à temperatura máxima da placa.

B- Produção de Guias Planares em Sol-Gel

Num frasco colocam-se os reagentes *EtOH*, *TPZ* e *MAA*, por esta ordem e nos volumes adequados à percentagem de zircónio no filme de sol-gel pretendida - Solução A. Os volumes são calculados de forma a obter as concentrações em massa de 20%, 30% ou 40% de zircónio. Obtêm-se os resultados da tabela 4.2. Esta solução é deixada em agitação durante 15 minutos.

Noutro frasco colocam-se *EtOH*, *MAPTMS* e *HCl*, por esta ordem, de acordo com os volumes indicados na tabela 4.2 - Solução B. Esta solução é deixada em agitação durante 15 minutos.

Reagente (V/ml)	Sol-Gel 20% Zr	Sol-Gel 30% Zr	Sol-Gel 40% Zr
EtOH	2.58	2.87	2.58
TPZ	2.96	2.22	1.48
MAA	0.563	0.42	0.28
MAPTMS	4.00	4.00	4.00
HCl 0.1M	0.50	0.50	0.50

Tabela 4.2: Volumes adequados à produção de sol-gel.

As soluções A e B são misturadas e 10 minutos depois procede-se à adição de 0.220 ml de *HCl*. A solução resultante é deixada em agitação durante 30 minutos, findos os quais é dada por sintetizada a solução de sol-gel.

O passo seguinte corresponde à deposição da solução sobre um substrato, (normalmente de "soda-lime") pela técnica de "spin-coating". Os substratos de "soda-lime" são obtidos por corte em duas partes iguais de lâminas de vidro, utilizadas vulgarmente em microscópios (lâminas de microscópio). Os substratos são lavados com detergente e são colocados em banho de acetona numa tina de ultra-sons durante 15 minutos, findos os quais são secos com ar comprimido filtrado.

A deposição da solução é realizada com uma seringa com filtro 0.2 μm sobre o substrato, seguida de rotação para uniformização do filme produzido. A rotação é dividida em duas fases: a primeira fase é de uniformização do filme, e consiste em três rotações durante 1 segundo efectuadas em intervalos de tempo de 30 segundos após a deposição da solução sol-gel sobre o substrato. Estas rotações são efectuadas com velocidade angular de 800 *rpm*; a segunda fase de estabilização do filme de sol-gel é realizada a 2000 *rpm* durante sessenta segundos, trinta segundos após a última rotação de uniformização.

Os factores que mais influenciam a qualidade do filme produzido são a limpeza do substrato sobre o qual se faz a deposição, a qualidade dos reagentes utilizados (não existência de grânulos), a correcta filtragem da solução de sol-gel e respectiva uniformização.

Após a deposição, o filme de sol-gel é curado no forno a 100°C, durante 30 minutos.

iii- Produção de Guias em Canal em Sol-Gel

O processo de escrita é realizado usando uma máscara do tipo "dark-field", que é colocada em contacto com o filme; este é exposto ao laser pulsado (10 Hz) de excímeros, a 248 nm. A exposição é realizada durante

30 s com a fluência média de 40 mJ/cm^2 .

A revelação é realizada com etanol. As zonas expostas tornam-se insolúveis em etanol, enquanto as zonas não expostas são solubilizadas.

Efectua-se a lavagem do substrato com água corrente para limpeza das zonas reveladas pelo etanol. A altura dos guias em canal obtidos depende da espessura dos guias planares de sol-gel; a geometria dos guias é definida pela máscara utilizada. Diferentes dispositivos podem ser introduzidos na mesma máscara.

Os dispositivos fabricados foram produzidos com a estrutura da secção de guia de onda da figura 4.3:

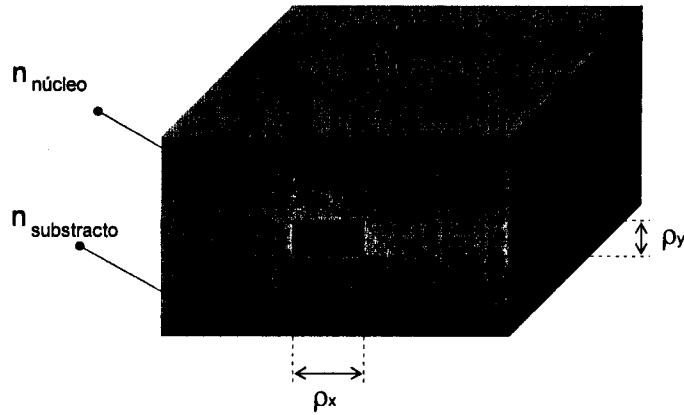


Figura 4.3: Esquema da secção transversal de guia em canal em sol-gel.

$$n_{\text{substrato}} = n_{\text{soda-lime}} \sim n_{20\% \text{Zr}}$$

$$n_{\text{núcleo}} = n_{30\% \text{Zr}}$$

Para $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ resulta:

$$n_{\text{soda-lime}} = 1.5001$$

$$n_{\text{substrato}} = 1.4998$$

$$n_{\text{núcleo}} = 1.5096,$$

o que verifica a aproximação para os índices do sol-gel 20% Zr e "soda-lime".

Dentro da tolerância de fabricação, foi utilizado $\rho_x = \rho_y = 4 \mu\text{m}$, como foi definido na secção 2.4.

4.3 Combinadores Coaxiais

A fabricação de combinadores coaxiais é realizada pela técnica descrita em 4.2, usando uma máscara produzida para o efeito (figura 4.4).

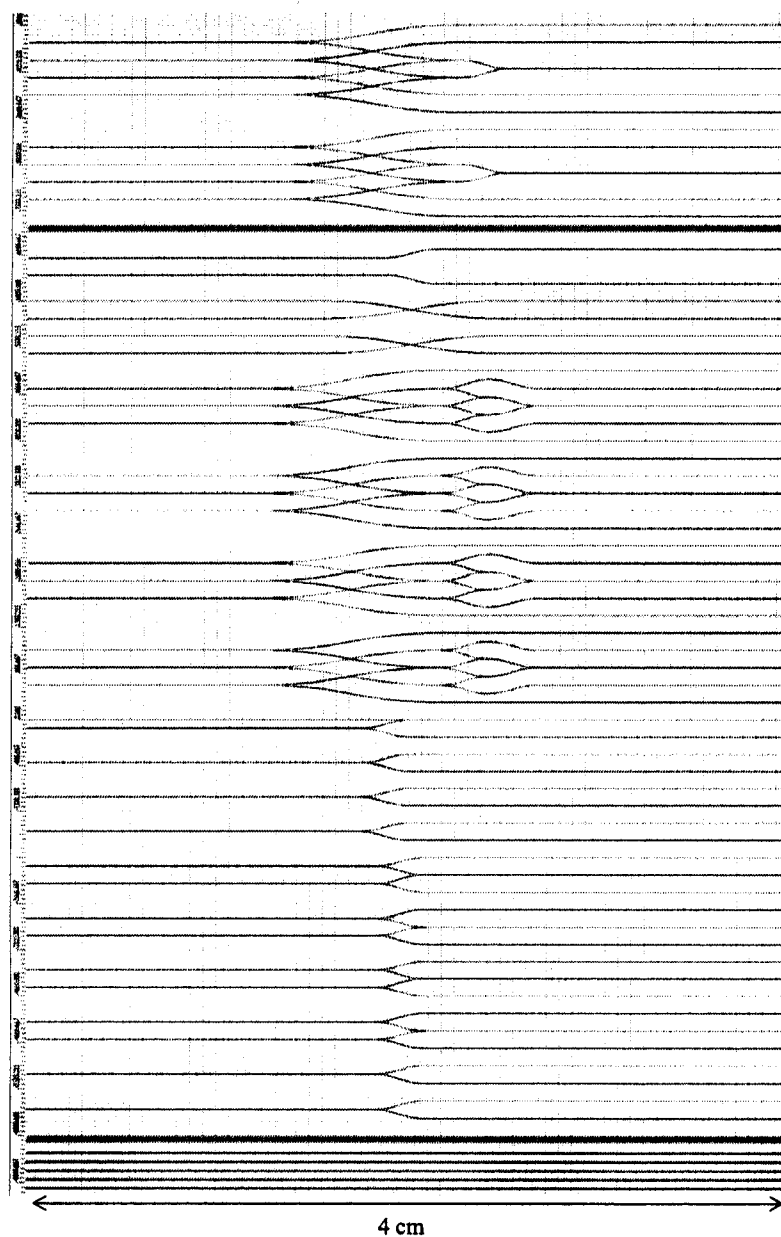


Figura 4.4: Máscara usada para fabricação de combinadores coaxiais.

i-Replicação de Máscara

A máscara produzida possui guias lineares, curvaturas em S, cruzamentos em X e junções em Y para medição da perda de cada função, de modo a ser possível obter resultados experimentais sobre as funções elementares em óptica integrada e ser possível compará-los com os valores numéricos calculados na secção 2.4. A máscara contém combinadores coaxiais de dois, três e quatro feixes. É de realçar que os desenhos implementados na máscara para estes combinadores não correspondem exactamente à optimização apresentada nesta dissertação, uma vez que a sua produção foi anterior à optimização exaustiva de funções; no entanto, a máscara que foi utilizada enquadra-se, em termos gerais, nos parâmetros optimizados. A principal diferença está na adopção de junções em Y com "taper" linear, como indicado na figura 4.5.

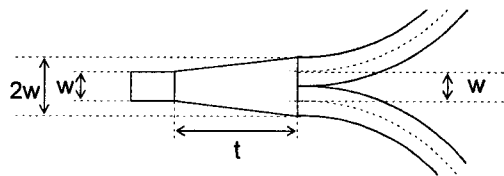


Figura 4.5: Junção em Y usada na construção dos dispositivos da máscara.

A máscara foi replicada, sendo para o efeito usados substratos de sílica e depositado um filme de níquel-crómio de 75nm de espessura (medição do evaporador). A taxa de deposição foi de $0.2 - 0.3\text{nm/s}$.

Os filmes metálicos foram expostos no alinhador de máscaras com lâmpada UV de comprimento de onda 243nm e revelados com solução de revelador 351. O tempo de exposição foi de 20 s e o tempo de revelação foi de 1 minuto. Após a lavagem com água corrente, as amostras foram colocadas no forno durante 15 minutos. A remoção do metal foi realizada com ácido clorídrico durante um minuto. As máscaras foram lavadas e secas. Efectuou-se um tratamento térmico, que consistiu em colocar a máscara à temperatura máxima da *hot - plate* durante 15 minutos, para aumento da resistência do filme metálico à exposição UV no laser de excímeros.

Foram obtidas fotografias no microscópio óptico que são reproduzidas na figura 4.6, em que em A se representa uma máscara com defeitos de replicação na zona do cruzamento em X. Nesta amostra foi revelado o "photoresist" com tempo superior ao indicado no texto acima. A imagem B mostra uma junção em Y sem "tip" significativo. A melhoria verificada em relação à máscara A deve-se ao tempo de revelação do "photoresist", corrigido, e a melhor qualidade de exposição no alinhador de máscaras, por corte

da amostra de forma a ser ajustada ao prato de rotação do alinhador. As imagens *B* e *C* foram retiradas da mesma máscara, utilizada para produção de dispositivos.

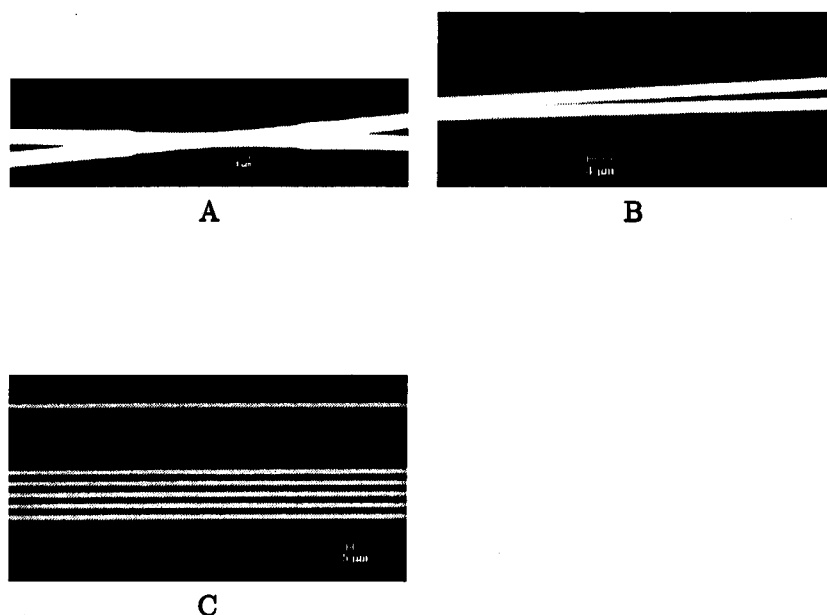


Figura 4.6: Imagens de detalhes de máscaras replicadas de combinadores coaxiais (microscópio óptico)

ii-Guias em Canal em Sol-Gel

O primeiro passo consiste em produzir um filme, o mais uniforme possível, de sol-gel. O filme foi produzido em sol-gel 30% Zr, sobre lâmina de microscópio. A espessura medida neste filme foi $4.1 \pm 0.3 \mu m$ (dados do perfilômetro). A uniformidade do filme é boa quando observada à vista desarmada; no entanto, o perfilômetro indica que a espessura do filme é superior no centro da amostra, cerca de $0.3 \mu m$, relativamente às extremidades da amostra.

Seguiu-se a fabricação de guias de onda em canal através da exposição do filme de sol-gel ao laser de excímeros, $\lambda = 248 nm$. Foi utilizada a melhor réplica da máscara produzida. Os guias de onda em canal foram observados ao microscópio óptico e foi determinada a largura de secção transversal por comparação com um padrão. A largura dos guias é de cerca de $4 \mu m$.

Seguiu-se a deposição de um filme de sol-gel 20%Zr que serve como superestrato e como protecção mecânica para os guias em canal.

iii- Clivagem e Polimento de Amostras

Para efectuar a caracterização dos dispositivos é necessário realizar a clivagem ou o polimento das amostras. Algumas amostras foram clivadas e outras foram polidas.

A clivagem é feita após realizar meio-corte no substrato de "soda-lime" que suporta o dispositivo. Para evitar a danificação do filme de sol-gel, em algumas amostras é previamente realizado meio corte; a clivagem é realizada de acordo com o esquema da figura 4.7. A clivagem é bastante rápida e aumenta consideravelmente a produtividade da fabricação de dispositivos; no entanto, não apresenta boa repetibilidade, na medida em que são desperdiçadas muitas amostras por má clivagem.

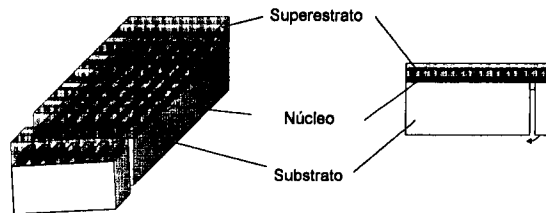


Figura 4.7: Processo de clivagem de amostras.

O polimento de amostras é realizado usando protecção sobre o filme de sol-gel. A protecção é implementada com um substrato de sílica, que é colado com cola epóxida sobre o filme de sol-gel. O processo de colagem recorre a cura com luz UV. A amostra e a protecção são cortadas com serra circular de diamante, de acordo com a figura 4.8. Após o corte, realiza-se o polimento das amostras, de acordo com o procedimento usual.

Foram obtidas fotografias no microscópio óptico que são reproduzidas na figura 4.9; a imagem *A* é de uma amostra fabricada em sol-gel, vista em perfil. Esta amostra não contém protecção de sílica. São identificados os guias de onda e as camadas que constituem os guias de onda. A imagem *B* apresenta uma amostra com protecção de sílica, depois de polida. Nesta imagem é evidenciado o perfil de índice dos guias fabricados, que é aproximadamente quadrado, de $4\ \mu m$ de lado.

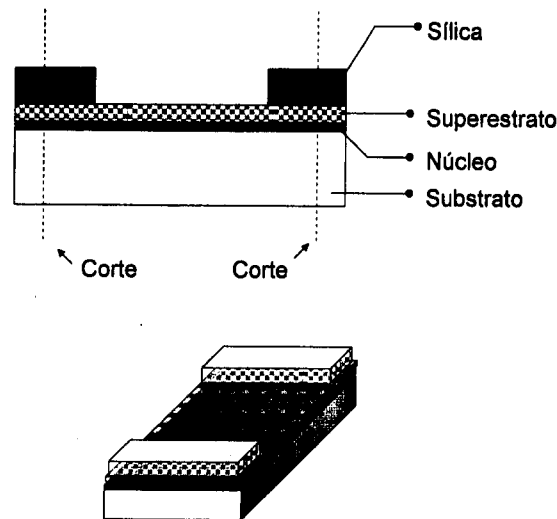


Figura 4.8: Corte de amostras para polimento.

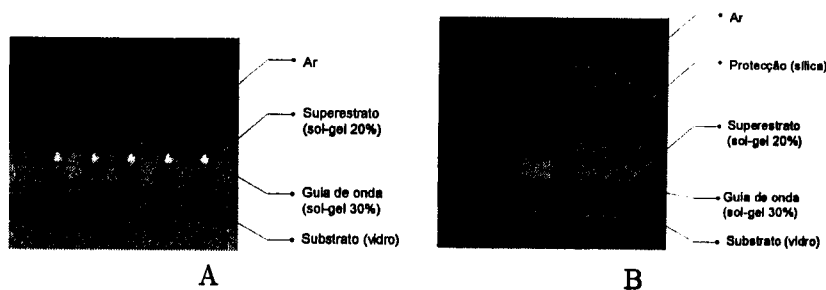


Figura 4.9: Imagens de amostras fabricadas (microscópio óptico)

4.4 Combinadores Multiaxiais

A fabricação de combinadores multiaxiais foi realizada usando as placas fotosensíveis escritas directamente com a máquina de escrita directa. Estas placas são sensíveis na zona do verde, razão pela qual são escritas com laser verde a 532 nm (segundo harmónico de um laser de Nd:YAG @ 1.06 μm).

A parametrização das estruturas que constituem o combinador é realizada e são introduzidos os dados para escrita nas placas fotosensíveis ("*Canyon Materials Inc Photomask Blank*") em linguagem "gerber".

As zonas com largura superior a 4 μm foram marcadas com passagens sucessivas, com espaçamento adequado para obter preenchimento uniforme. A obtenção de zonas uniformes nas placas fotosensíveis não foi inicialmente conseguida uma vez que o laser de escrita apresenta flutuações significativas

de potência, sendo o problema contornado pela introdução de um sistema de estabilização de potência, que melhorou significativamente os resultados.

As placas escritas são replicadas como máscaras originais para substratos de sílica, como descrito na secção 4.3, no parágrafo de replicação de máscaras. Importa realçar que as flutuações de potência observadas nas placas fotosensíveis são eliminadas quase na totalidade quando se faz a replicação da máscara para filme metálico.

A fabricação dos combinadores multiaxiais a partir das máscaras assim produzidas segue o procedimento descrito para os combinadores coaxiais.

i - Combinador 2TM

Foram fabricados combinadores multiaxiais de dois feixes com e sem fotometria; foram usadas máscaras como a representada na figura 4.10, que inclui saídas fotométricas.

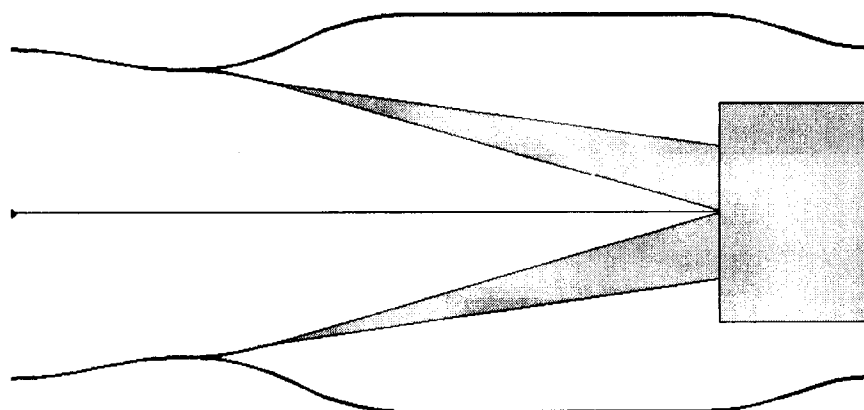


Figura 4.10: Máscara 2TM com fotometria, escrita e replicada.

A junção em Y introduzida anteriormente ao "taper" serve para extrair a fotometria para cada canal. Esta junção em Y é simétrica e está dimensionada de acordo com os parâmetros definidos no capítulo 2.3. Para além destas funções, foi prolongada a zona de propagação livre e foram introduzidas marcas para efectuar o polimento ou clivagem na posição onde a extensão do interferograma gerado é maior. Nas últimas máscaras produzidas foi introduzida uma junção em Y antes das entradas, para facilitar os testes de caracterização (o dispositivo pode ser testado com uma única entrada em termos de funcionalidade básica).

Os combinadores fabricados foram clivados e foi determinada a tolerância

de clivagem na zona de propagação livre. A margem de 0.5 mm foi determinada como aceitável, para obter o interferograma para o combinador de dois feixes.

Alguns resultados obtidos encontram-se na figura 4.11.

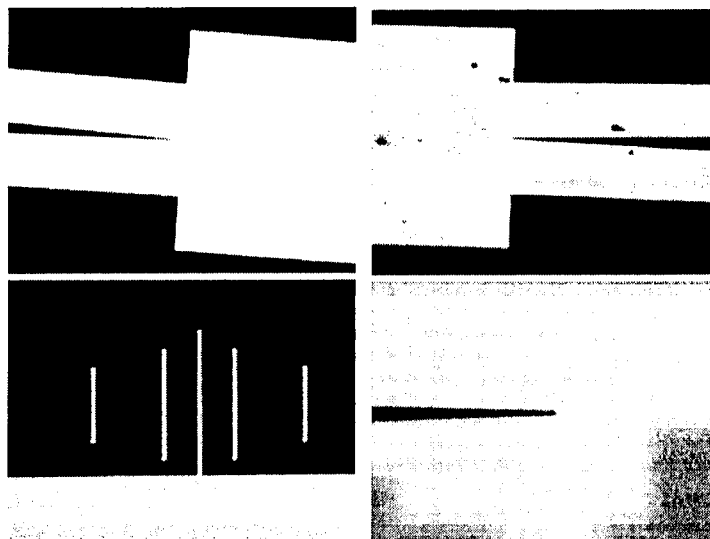


Figura 4.11: Imagens de microscópio óptico de detalhes da máscara do combinador multiaxial de dois feixes

As imagens da figura 4.11 mostram algumas das dificuldades que foram verificadas na replicação das máscaras de combinadores multiaxiais. Uma vez que tem zonas largas (propagação livre), a qualidade do filme de "photoresist" é determinante para que a exposição do laser de excímeros produza, na zona de propagação livre, um índice de refração aproximadamente constante.

Os resultados mostram que o parâmetro mais crítico na produção destes combinadores está na uniformidade do índice de refração na zona de largura elevada. Neste sentido, o controlo da qualidade do filme metálico é muito mais apertado que na fabricação dos combinadores coaxiais, em que apenas é necessária boa uniformidade do filme nas zonas expostas, que apresentam reduzida área (largura de $4\ \mu\text{m}$). Para além deste aspecto, foi controlada a uniformidade dos filmes de sol-gel de forma a obter a melhor uniformidade possível.

A medição da espessura dos filmes de sol-gel com o perfilómetro mostrou que a espessura ronda os $4\ \mu\text{m}$ (intervalo de $3.8\ \mu\text{m}$ a $4.2\ \mu\text{m}$). O aspecto mais limitador dos dispositivos fabricados está na largura dos guias produzi-

dos ($\sim 5\mu m$) que está ligeiramente acima do limite monomodo dos guias, mas que não pôde ser evitada, uma vez que foi usada a menor largura possível do feixe para escrita.

Na figura 4.12 apresenta-se a máscara de combinador multiaxial de dois feixes utilizada para fabricação de combinadores sem fotometria.



Figura 4.12: Imagem de microscópio óptico da máscara do combinador multiaxial de dois feixes. As escalas utilizadas nas direcções horizontal e vertical não são as mesmas.

4.5 Conclusões

Foram fabricados combinadores coaxiais e multiaxiais em tecnologia sol-gel híbrido, que consiste numa matriz de MAPTS-Zr, utilizada em diferentes percentagens de Zr para controlar o contraste de índice de refração. Os filmes produzidos apresentam boa uniformidade quando observados à vista desarmada e espessura média de $4\mu m$.

Os combinadores coaxiais foram fabricados a partir de uma máscara projectada no Departamento de Física e fabricada na Universidade de Glasgow. Esta máscara contém, para além das funções básicas em óptica integrada (guia linear, curvatura em S, cruzamentos em X e junções em Y), combinadores coaxiais de dois, três e quatro feixes.

As máscaras produzidas foram replicadas para substratos de sílica usando técnicas de fotolitografia comuns.

Foram fabricados combinadores coaxiais de dois e três feixes usando como núcleo dos guias sol-gel 30% Zr e como substrato sol-gel 20% Zr. As amostras produzidas foram clivadas, e destas foram polidas algumas unidades, usando protecção da camada de sol-gel. As amostras foram observadas e foram obtidas algumas fotografias no microscópio óptico dos combinadores produzidos, verificando-se qualidade aceitável dos combinadores.

A fabricação de combinadores multiaxiais foi realizada com as máscaras produzidas na unidade de escrita directa. Os materiais utilizados para o núcleo e para o substrato foram também sol-gel 30% Zr e 20% Zr, respectivamente.

Foram fabricados os combinadores multiaxiais de dois feixes apresentados na secção 3, com e sem fotometria. As amostras foram clivadas dentro da

tolerância de 0.5 mm.

Importa realçar que a utilização de fabricação em sol-gel permite rápida produção de dispositivos e, nesta perspectiva, é ideal para protótipos de combinadores tendo em vista eventuais futuras implementações recorrendo à tecnologia sílica-sobre-silício.

Capítulo 5

Caracterização de Combinadores em Óptica Integrada

Depois de fabricados, os combinadores foram caracterizados, usando o equipamento existente nos laboratórios do DF/UOSE. Usaram-se algumas bancadas já disponíveis na unidade e foram montadas novas bancadas, para assegurar a caracterização completa dos dispositivos fabricados.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: primeiramente descreve-se as medições de características básicas dos combinadores realizados; segue-se a descrição das bancadas de caracterização de dispositivos; para finalizar, apresenta-se as medidas obtidas e compara-se os valores experimentais com os valores previstos pela simulação numérica descrita no capítulo 3.

5.1 Medições de Características de Combinadores

A caracterização de combinadores pode ser organizada em três etapas fundamentais.

A primeira etapa de caracterização incide sobre as características dos guias de onda em canal que constituem o combinador. De seguida, é avaliada a birrefringência com um compensador de Babinet-Soleil. Na terceira caracterização, faz-se medições interferométricas sobre os combinadores.

A - Perda

A perda de acoplamento não é determinada directamente, mas é estimada por sobreposição entre o campo na face de saída da fibra e o campo na face de saída quadrada do guia em canal. A eficiência de acoplamento

é calculada a partir da expressão 5.1, em que d é o diâmetro do campo da fibra, w_x é a largura do campo modal do guia segundo a direcção do eixo dos xx e w_y segundo a direcção do eixo dos yy . Os diâmetros são relativos à largura total a $1/e^2$ da gaussiana de intensidade.

$$\eta = \frac{4}{\left(\frac{w_x}{d} + \frac{d}{w_y}\right) \left(\frac{w_y}{d} + \frac{d}{w_x}\right)} \quad (5.1)$$

Esta expressão é obtida por ajuste gaussiano dos campos da fibra e do guia em canal, que é avaliado por observação da distribuição de intensidade.

B-Birrefringência

A birrefringência, isto é, a existência de índices de refração efectivos diferentes para os modos do guia em canal com componentes transversais dominantes do campo eléctrico segundo a direcção dos eixos dos x ou y (EH e HE), pode ser quantificada pela expressão $\Delta n = n_{HE} - n_{EH}$, com n_{HE} o índice efectivo para o modo fundamental HE_{00} e n_{EH} o índice para o modo fundamental EH_{00} do guia.

A determinação da birrefringência é feita com um compensador de *Babinet-Soleil*. O compensador é previamente calibrado para que se conheça a relação entre o deslocamento do cristal de calcite e a diferença de fase entre as componentes lineares de polarização introduzida no feixe que atravessa o compensador.

Para além do compensador de Babinet-Soleil são usados polarizadores lineares. Com uma fonte linearmente polarizada e sem o guia em canal ajusta-se o polarizador até medir o valor nulo para a potência após o polarizador. Neste passo o compensador é colocado no ajuste que não introduz qualquer rotação na polarização do feixe. Este procedimento garante que a polarização linear da fonte está perpendicular ao polarizador e que eventuais alterações de polarização poderão ser compensadas pelo compensador de Babinet-Soleil.

Introduz-se o guia em canal no sistema óptico (neste momento o feixe polarizado linearmente procedente da fonte é guiado no guia em canal, atravessa o compensador e o polarizador). Se o guia for birrefringente, a polarização à saída do guia em canal é alterada e é medida uma potência não nula após o detector; actua-se então no compensador até que a potência volte a anular-se após o polarizador, o que significa que o compensador volta a colocar a polarização perpendicular à polarização do feixe de entrada. A medição do deslocamento do cristal de calcite é convertida em fase, através da curva de calibração do compensador, e a partir deste valor é determinada

a birrefringência através da expressão $\Delta n = \frac{\lambda \Delta \phi}{2\pi L}$, em que $\Delta \phi$ é a conversão em fase do deslocamento do cristal de calcite do condensador, λ é o comprimento de onda em que são efectuadas as medições e L é o comprimento de propagação no guia de onda.

C- Medições Interferométricas

A medição de visibilidade é feita com um interferómetro em fibra com um braço de propagação no ar, descrito em detalhe na secção 5.2.

A variação do comprimento de propagação no ar faz variar o caminho óptico para um dos braços e, assim, variar a fase relativa entre as entradas do combinador. Este interferómetro foi utilizado para os combinadores de dois feixes.

A visibilidade é determinada medindo a potência para a saída interferométrica e para as saídas fotométricas, variando a fase relativa entre as entradas. Obtém-se um diagrama de intensidade luminosa em cada saída para diferentes caminhos ópticos no ar.

Para a saída em potência no canal de interferometria é esperada uma curva típica como a apresentada na figura 5.1, a partir da qual pode ser determinada a visibilidade das franjas.

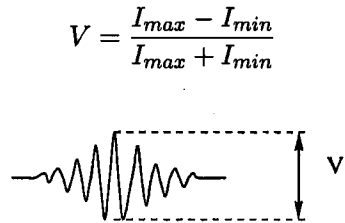


Figura 5.1: Determinação da visibilidade a partir de um interferograma.

Este interferograma é denominado normalmente "interferograma em bruto", e apresenta uma visibilidade menor que 1, em geral, devido às intensidades dos dois canais não estarem equilibradas. É realizada a correcção do interferograma, usando a expressão:

$$I_c = \frac{I_0 - \alpha Pa - \beta Pb}{2\sqrt{\alpha Pa \beta Pb}} \quad (5.2)$$

em que Pa Pb são as potências medidas nas saídas fotométricas e α e β são calculados pelos quocientes $\alpha = I_a/Pa$ e $\beta = I_b/Pb$, em que I_a é a potência medida no braço interferométrico quando apenas é introduzido sinal no canal A , e analogamente para o canal B do interferómetro.

O interferograma corrigido (I_c) apresenta, idealmente, visibilidade unitária.

5.2 Bancadas de Caracterização Implementadas

Foram usadas três bancadas de caracterização para realizar as medições descritas na secção 5.1. As bancadas estão representadas, como esquema de princípio, nas figuras que se seguem.

A-Perda

Nesta bancada utiliza-se a unidade de caracterização do DF/UOSE constituída por um microscópio, microposicionador de dispositivos com quatro eixos (x, y, z e ajuste de inclinação) e unidades de microposicionamento de entrada e saída (para utilização de fibras ópticas monomodo e/ou objectivas de microscópio). As entradas e saídas podem ser ajustadas em três eixos (x, y, z) e em inclinação(α). (Ver figura 5.2.)

Bancada A

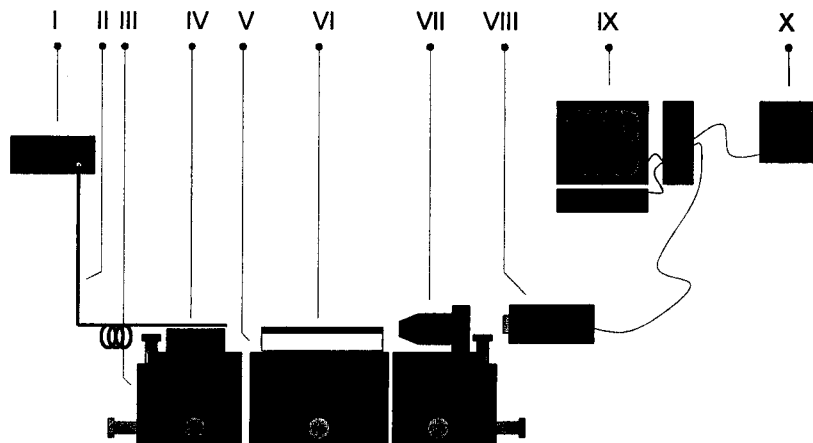


Figura 5.2: Bancada de caracterização A - Perda.

Os componentes indicados na figura 5.2 são:

- I - Fonte laser ou de fonte luz branca
- II - Fibra de entrada (uma única fibra ou fibras em V-grooves)
- III - Posicionador da fibra de entrada (x, y, z)
- IV - Controlador de rotação da(s) fibra(s) de entrada (θ_{in})
- V - Posicionador do dispositivo em teste
- VI - Dispositivo em teste
- VII - Lente de formação de imagem (em posicionador)
- VIII - Câmara *Vidicon IR* (ou detector)
- IX - Computador com software de processamento de imagem
- X - Ecrã de observação da intensidade medida na câmara (VIII)

Nesta bancada existem as seguintes fontes (I): laser He-Ne a 632.8 nm, díodo laser na região de 1300 nm, fonte de luz branca (lâmpada de halogénio) e fonte de espectro largo (SLD) na região de 1300 nm.

Existe uma câmara *Vidicon IR* que pode ser usada, com software apropriado ("Fitas", software desenvolvido no DF/UOSE), para adquirir o perfil de intensidade. Em termos de detectores, existem detectores a 633 nm e 1300 nm, analisador de espectros ópticos (OSA) e módulos de medição de potência para vários comprimentos de onda.

B-Birrefringência

Nesta bancada utiliza-se um combinador de *Babinet-Soleil* previamente calibrado. Para calibração utiliza-se a montagem de baixo da figura 5.3. Para medição da birrefringência utiliza-se a montagem de cima da figura 5.3.

Os componentes indicados na figura 5.3 são:

- I - Laser com saída em fibra (1300 nm)
- II - Fibra do tipo PM ("polarization maintaining")
- III - Controlador de polarização (ajustado para polarização linear)
- IV - Controlador de rotação da fibra de entrada
- V - Dispositivo em teste
- VI - Lente de colimação
- VII - Compensador Babinet-Soleil
- VIII - Polarizador (implementado com PBS - "polarization beam splitter")
- IX - Detector de potência

A utilização do controlador de rotação pressupõe alinhamento angular da fibra posicionada através da projecção do feixe colimado de laser de He-Ne num ecrã a cerca de 5 metros de distância. O alinhamento é considerado aceitável quando no alvo se medem rotações com diâmetro menor que 2 cm

Bancada B

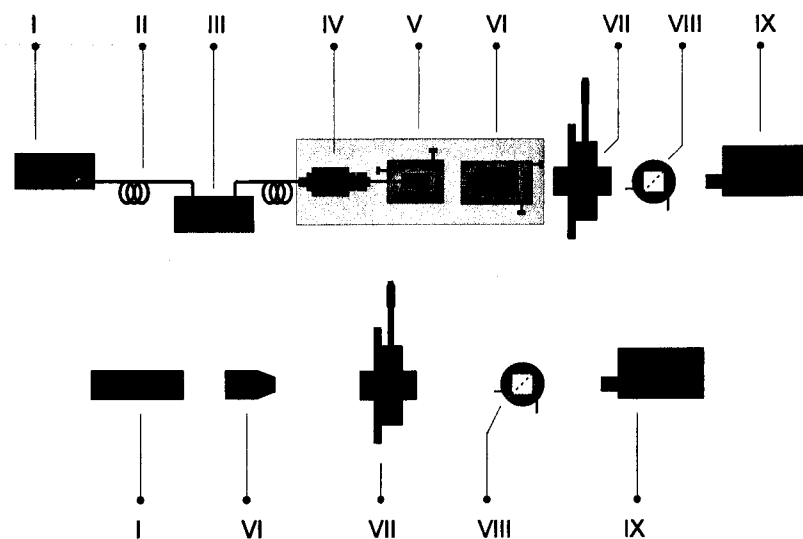


Figura 5.3: Bancada de caracterização B - Birrefringência.

(desalinhamento angular máximo de 0.1°).

C-Medições Interferométricas

Nesta bancada utiliza-se um acoplador direccional em fibra (para 1300 nm) e uma fonte de espectro largo.

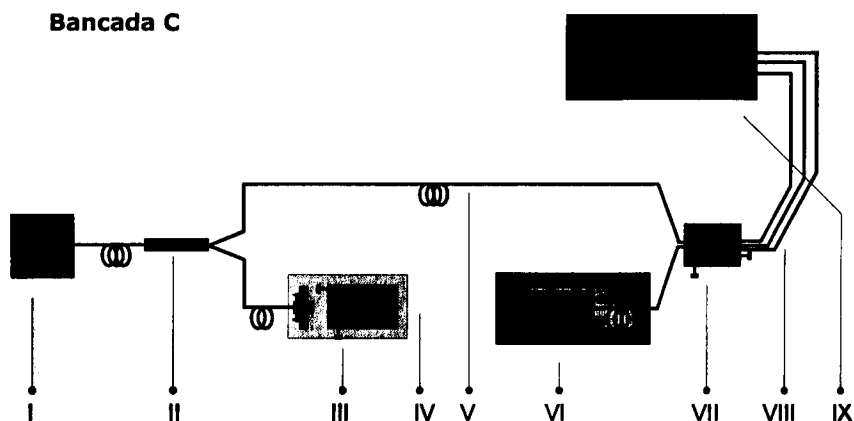


Figura 5.4: Bancada de caracterização C - Medições Interferométricas.

Os componentes indicados na figura 5.4 são:

- I - Fonte de espectro largo ($\lambda_0 = 1300 \text{ nm}$; $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$)
- II - Acoplador direccional
- III - Lente de colimação
- IV - Propagação no ar
- V - Propagação em fibra monomodo convencional
- VI - Lente de colimação (posição variável)
- VII - Dispositivo em teste
- VIII - Fibras de saída
- IX - Módulo detector de potências

Esta bancada tem como objectivo produzir uma linha de atraso que permita excitar as entradas de um combinador de dois feixes com sinais desfasados de uma quantidade controlável. O sinal de uma fonte de espectro largo é dividido num acoplador em fibra. Um destes sinais é guiado apenas em fibra, enquanto o outro apresenta uma porção do caminho em ar, que é ajustável. O comprimento do caminho em ar determina o atraso de fase introduzido entre as saídas.

5.3 Medições Efectuadas

Os resultados experimentais foram organizados em função das bancadas onde foram obtidos. Os resultados apresentados referem-se à caracterização dos combinadores coaxiais e multiaxiais de dois feixes.

Bancada A - Perda

Foi medida a potência para cada função existente na máscara e sistematizados os resultados. Para caracterização das funções foram utilizadas amostras clivadas e amostras polidas.

As amostras clivadas foram analisadas introduzindo luz no combinador através de fibra monomodo. Com as melhores condições de alinhamento foi determinada uma eficiência de acoplamento de 87%, e perda de propagação de 0.6 dB/cm. Este resultado é relativamente concordante com o que está apresentado em [17], de 0.4 dB/cm.

Para as curvaturas em S, o valor máximo de perda medido devido à função, excluindo propagação, tem o mesmo valor (dentro do erro de medição) para as curvaturas em S e para os guias lineares, o que evidencia perda muito baixa para esta função.

Para os cruzamentos em X foi medido o "crosstalk" máximo de 0.35 %, que corresponde a -24,6 dB.

As junções em Y foram caracterizadas em termos de divisão de potência e em termos de perda global. Em termos de divisão de potência verifica-se discordância máxima de 4.6% em potência. Quanto à saída em potência, verificou-se perda de 0.6 dB, o que significa 2.2% em potência. O teste foi realizado com o comprimento de onda de 1300 nm, com baixa largura de banda. (ver espectro da fonte na figura 5.5).

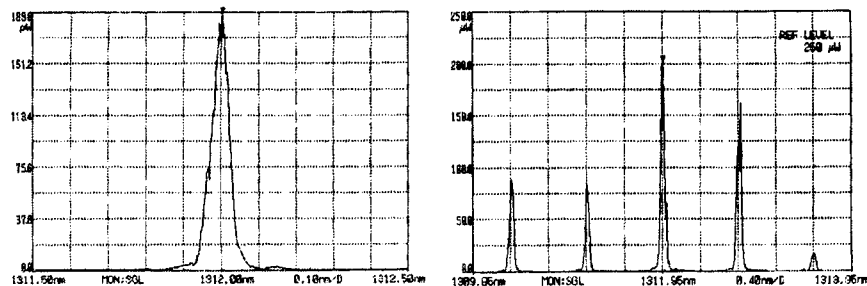


Figura 5.5: Espectro da fonte usada para caracterização das funções existentes na máscara fabricada.

Para o combinador multiaxial de dois feixes, foi adquirido o padrão de interferência com uma câmara Vidicon IV, usando como fonte o díodo laser na região dos 1300 nm.

A imagem obtida está na figura 5.6, no topo, e na figura abaixo está um perfil de intensidade desta figura numa zona onde a visibilidade é maior. A curva a tracejado representa uma função $\cos^2(\theta)$ e serve apenas para avaliar se existe repetição periódica do padrão observado. A medição do período das franjas foi realizada por comparação com a imagem obtida para um conjunto de franjas separadas de $20\ \mu m$, obtendo-se um período aproximado de $20.5\ \mu m$, em relativa concordância com o esperado.

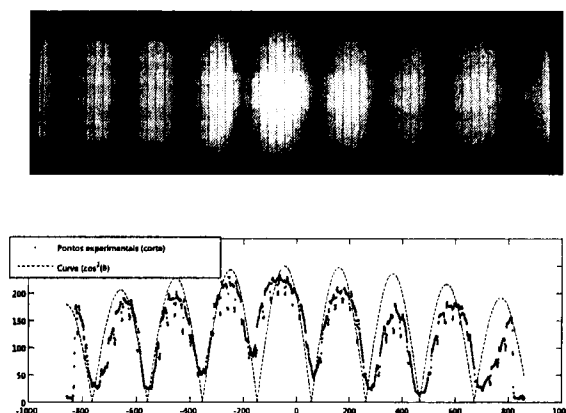


Figura 5.6: Interferograma em bruto para combinador 2TM. A figura de baixo apresenta um corte numa transversal onde a visibilidade é elevada.

Verificou-se que a introdução de fase diferencial nos braços do interferómetro provoca deslocamento lateral do interferograma, confirmando assim as previsões.

Bancada B - Birrefringência

A birrefringência foi avaliada para guias em canal de uma amostra clivada. Usando a bancada representada na figura 5.3, foi determinado o estado de polarização da luz na saída da fibra PM e ajustado este estado por rotação da fibra até a polarização ser aproximadamente linear.

Com recurso a um cubo divisor de polarização (*PBS- Polarization Beam Splitter*) na região de 1300 nm, foi determinada a direcção de polarização (direcção segundo a qual a potência tinha o valor mais elevado). Na direcção perpendicular a esta a potência medida é cerca de 5% da potência na direcção de polarização.

A mesma medição foi realizada para a luz depois de ser guiada por um guia em canal, sendo determinado o mesmo quociente entre potências na direcção de polarização do feixe de entrada e na direcção perpendicular a esta. Verificou-se que a direcção de polarização na saída do guia em canal coincide com a polarização à entrada, independentemente do ângulo entre a polarização na fibra de entrada e o dispositivo em teste.

Esta medição mostra apenas que a birrefringência do guia linear é pouco significativa, mas não permitiu determinar um valor numérico para esta grandeza devido aos erros na medição de potência quando é introduzido o compensador de Babinet-Soleil, e ainda pela fraca reprodutibilidade do procedimento usado, nomeadamente a definição do estado de polarização do feixe de entrada.

A medição do valor de birrefringência deve usar uma fibra PM e um controlador de polarização. Esta medição não foi realizada uma vez que a fibra PM com entrada adaptada ao controlador de polarização não estava disponível em tempo útil para a efectuar medições.

Assim, foi realizada a montagem de uma bancada que permitisse confirmar os primeiros resultados obtidos, cuja fotografia está na figura 5.7.

Foi utilizado um díodo laser a 1.3 μm e um laser He-Ne para efeitos de alinhamento. Os feixes dos dois lasers foram alinhados para que o feixe vermelho sirva como referência para alinhamento. Os feixes foram acoplados a uma fibra do tipo "Panda", com birrefringência elevada, designada daqui em diante por fibra PM. A entrada e saída da fibra PM é ajustada através de posicionadores angulares montados sobre plataformas com ajuste das posições (x,y,z) e em duas direcções angulares. As fibras foram alinhadas nos posicionadores angulares com alinhamento melhor que 0.1 °. A entrada e a saída da fibra PM são ajustadas até obter polarização linear na saída da fibra PM. O estado de polarização foi verificado por rotação da saída com um polarizador linear. A potência em função do ângulo da saída está representada na figura 5.8. A análise deste gráfico mostra que a polarização

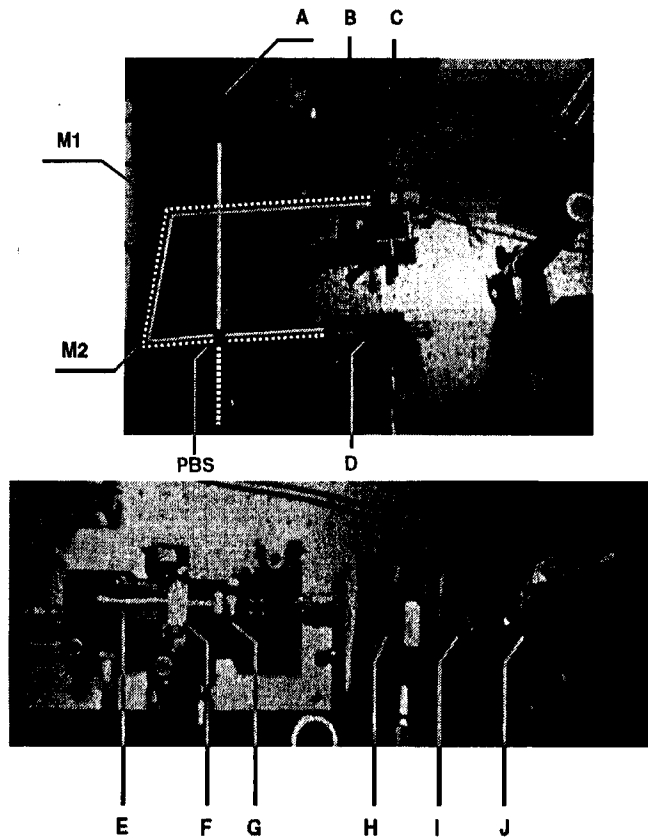


Figura 5.7: Fotografia da bancada de birrefringência.

- A - Laser de He-Ne
- B - Lente de colimação
- C - Díodo laser 1300 nm
- D - Controlador de rotação da entrada da fibra(θ_{in})
- E - Controlador de rotação da saída da fibra(θ_{out})
- F - Dispositivo em teste
- G - Lente de colimação
- H - Compensador Babinet-Soleil
- I - Polarizador (cubo divisor de polarizações)
- J - Detector para 1300 nm
- M1 - Espelho plano
- M2 - Espelho plano
- PBS - Cubo divisor de polarização (*"polarization beam splitter"*)

é quase linear, com quociente entre potências nas direções cruzadas de 3%.

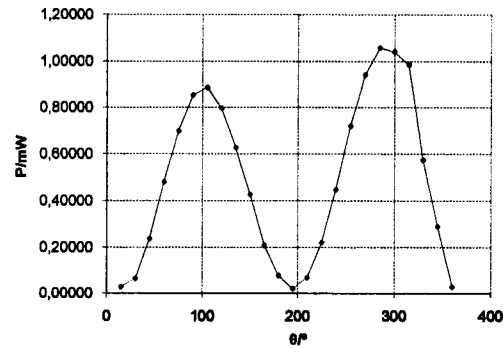


Figura 5.8: Potência em função do ângulo de saída, para o melhor ajuste a polarização linear.

Introduzindo um dispositivo, foi repetida a medição de potência para a mesma posição do polarizador utilizada na determinação anterior e para uma posição perpendicular a esta. Os resultados experimentais estão representados na figura 5.9.

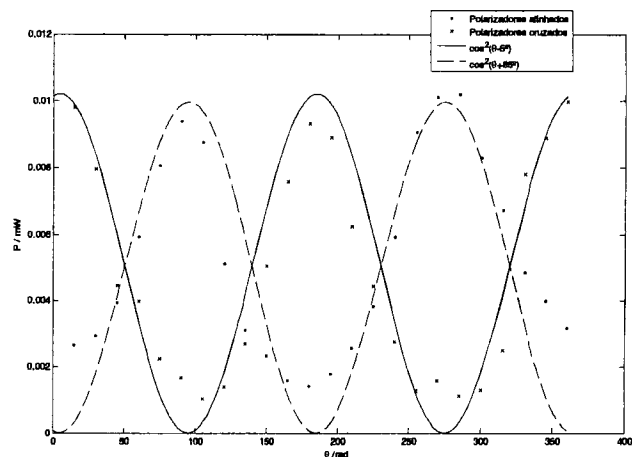


Figura 5.9: Potência em função do ângulo, para polarizador de saída alinhado e cruzado. As curvas a cheio representam o que seria obtido se a polarização fosse linear.

Os resultados apontam para que a polarização seja mantida após o dispositivo, e que radiação linearmente polarizada à entrada do guia de onda

permaneça linear após o dispositivo em teste. Este resultado mostra que a birrefringência é baixa e que se pode, em boa aproximação, desprezar o efeito do dispositivo na polarização à entrada do mesmo.

Bancada C - Medições Interferométricas

Para efectuar as medições interferométricas sobre um combinador 2TC foi usada a fonte de espectro largo (espectro da fonte na figura 5.10).

A largura de banda da fonte é 55 nm e o comprimento de onda central é 1260 nm, o que resulta num comprimento de coerência de:

$$L_{coerencia} \sim \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \sim 28\mu m.$$

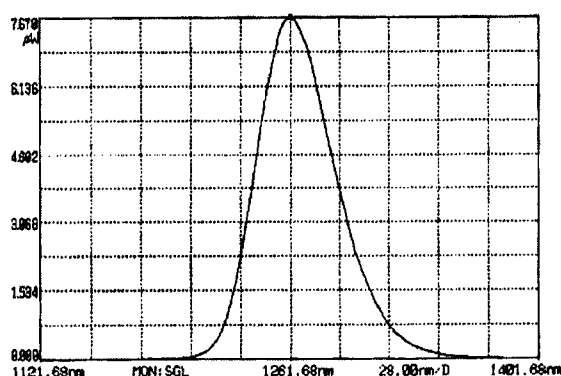


Figura 5.10: Espectro da fonte SLD utilizada nas medições interferométricas.

Para a bancada representada na figura 5.4, o comprimento dos braços foi igualizado até ao centímetro. O ajuste fino dos comprimentos é realizado por ajuste da porção de caminho no ar. As potências no braço fechado e no braço aberto têm uma diferença de cerca de 0.5 dB num intervalo de 3.0 cm em torno da posição do posicionador calculada para o máximo (13 cm em ar). Para a realização de medições, foi introduzida perda no braço com maior potência de forma a obter aproximadamente a mesma potência em ambos os braços.

Para obter o interferograma fez-se deslocar a lente de colimação (e fibra) de forma a obter diferença de fase na vizinhança do ponto de equilíbrio dos braços. O deslocamento é realizado a velocidade constante de $3.5 \mu m/s$ e as potências são adquiridas 512 vezes por segundo, obtendo-se saídas em potência para o combinador coaxial de dois feixes. A visibilidade deste interferograma é 50.5%.

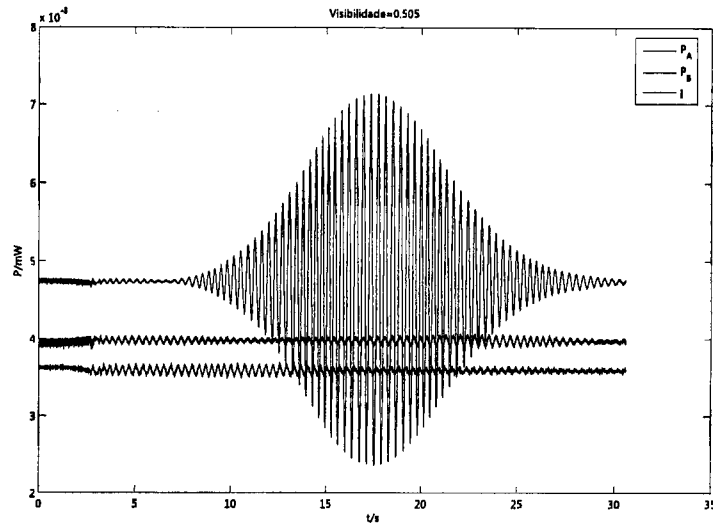


Figura 5.11: Dados experimentais de potência para as saídas do interferograma do combinador 2TC (interferograma em bruto).

A aplicação da fórmula de correcção 5.2, produz o interferograma corrigido apresentado na figura 5.12. Os parâmetros de correcção $\alpha = 0.598$ e $\beta = 0.626$ foram determinados a partir dos coeficientes entre a potências nos braços interferométrico e fotométrico. O valor corrigido da visibilidade é 98%.

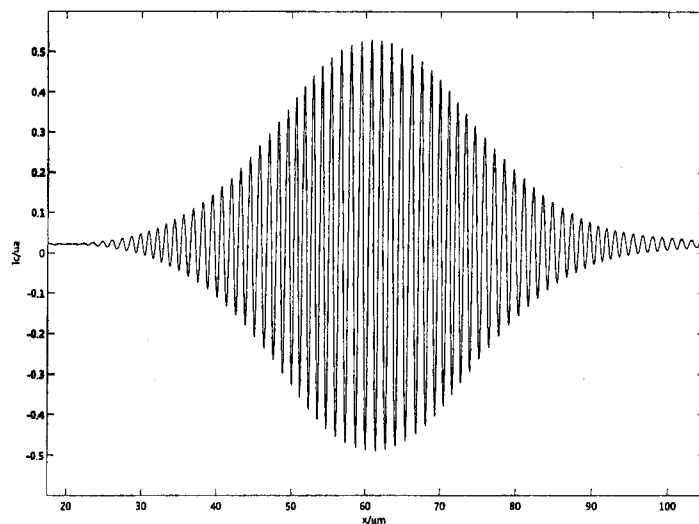


Figura 5.12: Interferograma corrigido para combinador 2TC.

A envolvente de coerência do interferograma está de acordo com o valor estimado. O Número de franjas entre pontos a 0.5 do máximo é 24, valor que pode ser comparado com $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 23$, para a fonte usada.

5.4 Conclusões

Para caracterizar os combinadores fabricados foram utilizadas algumas bancadas existentes e foram montadas novas bancadas de caracterização.

A perda de propagação medida foi de 0.6 dB/cm e as perdas para as funções de óptica integrada são concordantes com as previsões efectuadas através de simulação numérica de funções.

A birrefringência dos guias foi analisada utilizando um díodo laser a 1300 nm. A birrefringência dos guias em canal é baixa, uma vez que não são verificadas variações para a polarização de um feixe linearmente polarizado quando é guiado num guia em canal, independentemente da orientação relativa entre a polarização de entrada e o dispositivo em teste.

O teste interferométrico foi realizado para os combinadores de dois feixes nas configurações coaxial e multiaxial.

Foi utilizado um interferómetro com dois braços equilibrados, um deles com parte do percurso em ar, que possibilita ajuste. Não foi controlada a polarização nesta bancada. A fonte utilizada apresenta um comprimento de coerência de $\sim 34\mu m$.

Para um combinador coaxial de dois feixes, o interferograma obtido apresenta visibilidade de 50.5%, que quando corrigida pelas potências dos dois canais resulta em 98%.

O comprimento de coerência medido está de acordo com a previsão efectuada.

Com o combinador multiaxial de dois feixes, foi adquirido o padrão de interferência com uma câmara Vidicon IV, para um díodo laser a 1300 nm, obtendo-se o padrão de interferência. O período espacial das franjas medido foi de $20.5\mu m$, em concordância com o valor previsto teoricamente ($20.0\mu m$).

Capítulo 6

Combinador Avançado em Óptica Integrada

O conceito de combinador avançado está directamente ligado com as funções de "Metrologia" e "Ciência" analisadas na secção 6.1. Trata-se de um dispositivo fabricado total ou parcialmente em óptica integrada que recolhe e processa informação, efectuando a combinação de feixes e monitorizando globalmente o sistema óptico de interferometria, permitindo o seu controlo, de modo a ser possível recolher informação astronómica relevante. Seguidamente apresenta-se um combinador avançado, usando a filosofia de [7].

6.1 Sistema de Metrologia e Sistema de Ciência

O objectivo da construção de um combinador de feixe é obter um interferograma com a maior visibilidade possível, a partir da radiação de uma matriz de telescópios, possibilitando, dessa forma, a reconstrução da imagem de um objecto astronómico.

Para que o sistema interferométrico possa realizar as funções descritas na secção 1.2, necessita de um sistema de controlo, que não é trivial, e que promove o seu funcionamento em condições optimizadas. Este sistema de controlo é chamado "Sistema de Metrologia", e o sistema controlado é chamado "Sistema de Ciência". Para coordenação dos sistemas de ciência e metrologia são utilizados pacotes de software que correm em plataformas comuns como o *LINUX*, e que asseguram a coordenação de cada um dos sub-sistemas com tempo de resposta inferior a 1 ms.

O "Sistema de Metrologia" pode ser implementado de várias formas. Uma implementação possível consiste em fazer passar, pelo maior percurso possível do "Sistema de Ciência", um feixe conhecido (por exemplo, prove-

niente de uma fonte laser) e estudar as suas alterações, para controlar o "Sistema de Ciência".

A referenciação, que permite a determinação da correcção a aplicar, utiliza uma referência de fase, medindo a alteração da fase do sinal de metrologia, para ajustar dinamicamente o "Sistema de Ciência".

Alguns métodos mais sofisticados para efectuar este controlo são apresentados em [14], como técnicas de referenciação de fase, em que são utilizadas fontes próximas como referência, ou a mesma fonte em comprimentos de onda diferentes daquele que é usado para "Ciência".

É relevante distinguir entre "Sistema de Metrologia", sistema de estabilização de franjas e sistema de controlo da frente de onda dos telescópios. O sistema de estabilização de franjas é anterior ao combinador e actua sobre os caminhos ópticos para efectuar a igualização dinâmica dos caminhos ópticos entre os feixes. O sistema de controlo da frente de onda dos telescópios ajusta ligeiramente a forma geométrica de um reflector (óptica adaptativa), com vista à correcção de defeitos introduzidos na frente de onda pela turbulência atmosférica, por exemplo. Com o "Sistema de Metrologia" determina-se, em termos ópticos, as flutuações de fase sofridas por cada feixe, e efectua-se a sua compensação de forma a tornar o sistema equivalente para todos os feixes envolvidos.

O "Sistema de Ciência" consiste no sistema de combinadores implementados com as funções apresentadas nos capítulos anteriores, eventualmente com saídas fotométricas. Os combinadores podem ser implementados nos esquemas coaxial, matricial ou multiaxial, como descrito anteriormente.

6.2 Projecto de Combinador Avançado de Dois Feixes

O projecto de um combinador avançado baseou-se na descrição apresentada em [7]. O esquema de princípio da figura 6.1 é descrito de seguida.

A função de Metrologia é assegurada pelo circuito a tracejado na figura 6.1. Este sistema é alimentado por um laser estabilizado, com um comprimento de onda de emissão fora da banda de observação astronómica para a qual o combinador é dimensionado. O sinal do laser é dividido em duas partes, uma para propagação ida e volta no sistema óptico e outra usada como referência de fase.

O "feixe de metrologia" vai percorrer o sistema óptico da saída do combinador em óptica integrada até ao telescópio e desde o telescópio até à entrada no combinador em óptica integrada. O "feixe de metrologia" é re-

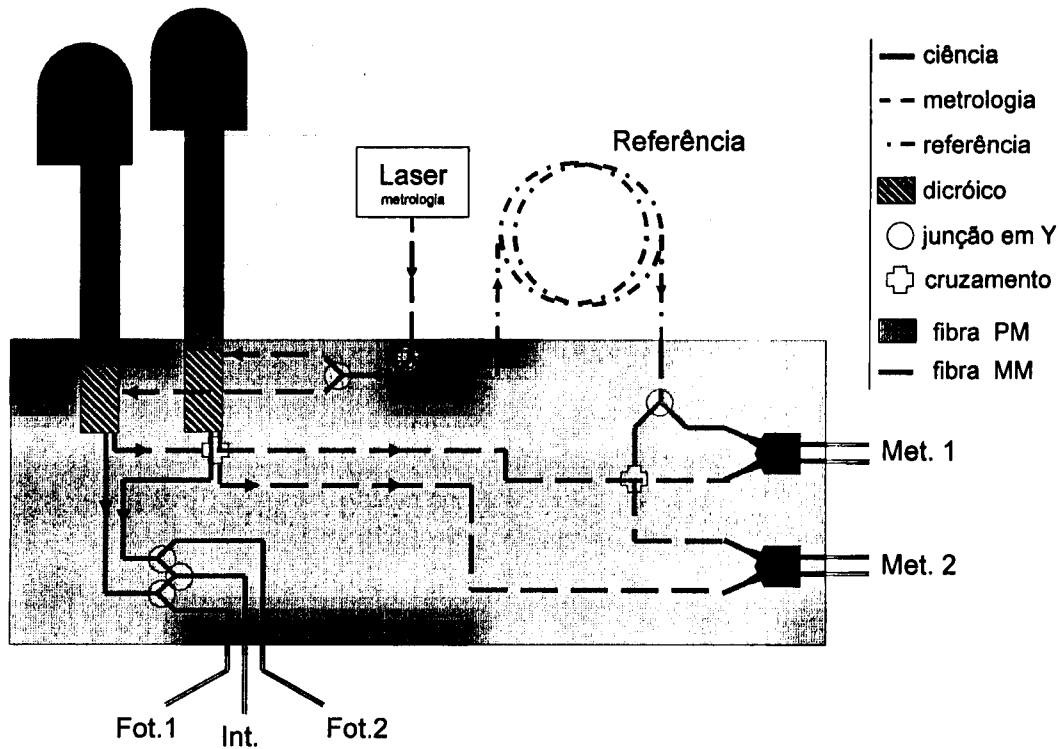


Figura 6.1: Diagrama de princípio de combinador avançado de dois feixes. Detalhes no texto.

tirado do guia através de uma função dicróica (ver secção 6.3), isto é, uma função que apenas extrai o comprimento de onda de metrologia do guia de onda em canal do dispositivo.

O sinal de referência é gerado a partir do sinal do laser que alimenta o Sistema de Metrologia, fazendo passar o sinal de saída do laser por uma série de voltas numa bobina de fibra óptica monomodo, cuidadosamente controlada e estabilizada para assegurar um percurso óptico que possa servir como referência.

O sinal de referência é combinado com os sinais de metrologia em combinadores multiaxiais de dois feixes. Este sistema permite medir variações de fase relativa entre os feixes de referência e de metrologia, por variações da posição da franja central do interferograma, como foi discutido na secção 1.3. A informação de fase é recolhida medindo a intensidade luminosa em dois pontos do interferograma correspondentes a um máximo e a um mínimo. A variação da diferença de fase provoca variação de potência em cada saída, que pode ser interpretada facilmente para obter variação positiva ou negativa

de fase no canal de metrologia. As saídas do combinador multiaxial devem ser implementadas em fibra óptica multimodo, para minimizar a perda de potência na interface entre o dispositivo óptico integrado e a fibra óptica.

A informação de fase recolhida é processada para actuar sobre o canal de "Ciência", de forma a compensar diferenças de fase entre os sinais de Ciência admitidos ao combinador de feixes.

O sinal de "Ciência" é combinado num esquema pré-determinado (combinação coaxial, no diagrama da figura 6.1). As saídas fotométricas e interferométrica são lidas na forma de potência em fibras ópticas multimodo, pela mesma razão descrita para as saídas de metrologia. As entradas do dispositivo são acopladas a fibras monomodo PM.

A implementação da função dicróica para a banda de observação astronómica J, essencial para o funcionamento conjugado dos sistemas de Ciência e Metrologia, é discutida na secção seguinte.

6.3 Função Dicróica

Embora a implementação da função dicróica não seja detalhada em [7], podem ser delineadas algumas características que lhe são requeridas.

A função caracteriza-se por extrair um comprimento de onda de metrologia do guia de onda em canal onde viajam sinais de "Metrologia" (banda estreita) e "Ciência" (largura de banda de centenas de nanómetros), de acordo com o representado no diagrama da figura 6.2.

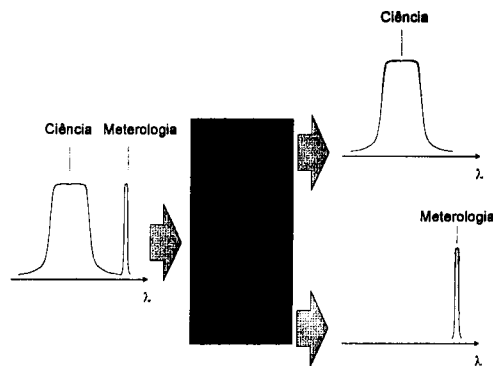


Figura 6.2: Diagrama de separação dos sinais de "Metrologia" e "Ciência" em comprimento de onda.

Em termos de entradas e saídas, a função dicróica deve permitir inserir o sinal de "Metrologia" proveniente do laser estabilizado e retirar o sinal de

"Metrologia" proveniente do telescópio. O sinal de "Ciência", proveniente do telescópio, não deve ser modificado (ver diagrama da figura 6.3).

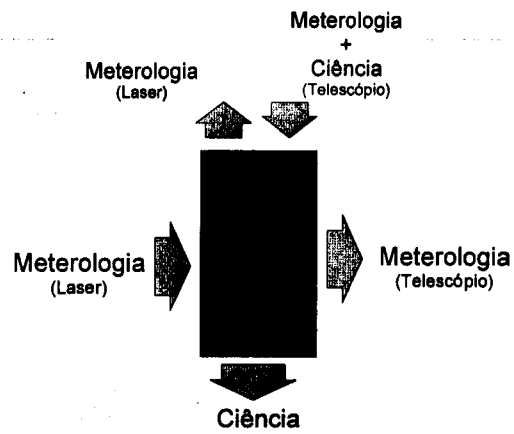


Figura 6.3: Diagrama de separação espacial dos canais de "Metrologia" e "Ciência".

6.4 Conclusões

A óptica integrada para fins astronómicos apresenta potencial de utilização não só no sistema interferométrico, que comporta o conjunto de funções em óptica integrada implementados com o objectivo de formar franjas e a partir destas efectuar a reconstrução da imagem do objecto astronómico em observação (sistema de "Ciência"), mas também como sistema de controlo e ajuste dinâmico do sistema de "Ciência", denominado sistema de "Metrologia".

Um combinador avançado integra funções de "Ciência" e "Metrologia" num único circuito óptico integrado. A fabricação de um combinador avançado foi reportada [7], para um sistema de três feixes. Não existem detalhes sobre a implementação de cada uma das funções em óptica integrada. Nesta dissertação apenas foi discutido o esquema de princípio de um combinador avançado de dois feixes (que é generalizável a um maior número de feixes).

Uma das funções centrais em óptica integrada deste dispositivo é a função dicróica, que deve servir como porta de entrada e saída do sinal de "metrologia" no sistema óptico integrado. Esta função deve combinar/separar o sinal de metrologia (banda estreita) do sinal proveniente do telescópio (banda larga).

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

Foram estudados os princípios de funcionamento de combinadores ópticos para aplicação em interferometria astronómica e analisadas em detalhe configurações baseadas em junções em Y (combinadores coaxiais com fotometria) e em interferência em guias planares (combinadores multiaxiais, com ou sem fotometria). Os combinadores foram projectados para a banda de observação astronómica J (centrada em $1.26\mu\text{m}$ e com largura de banda de 310 nm) e foi previsto o seu desempenho usando simulação numérica (BPM).

A tecnologia sol-gel híbrido foi aplicada à fabricação dos dispositivos combinadores de feixe.

Foi estudada a implementação de bancadas de caracterização de parâmetros fundamentais de combinadores em óptica integrada.

Importa realçar que os princípios do projecto apresentados podem ser adaptados à implementação com tecnologia de sílica-sobre-silício (perda inferior) e mesmo a outras bandas de observação (H ou K).

Na sequência imediata do trabalho efectuado irão ser fabricados e caracterizados mais combinadores nos diferentes esquemas de combinação.

Deve seguir-se um estudo, fabricação e caracterização de combinadores multiaxiais com mais de três feixes, tipicamente seis feixes.

O estudo de princípio de aplicação de dispositivos ópticos integrados em outras funções de interferómetros astronómicos apresenta elevado potencial, nomeadamente no controlo de polarização, ajuste rápido de franjas de interferência ("fringe tracking"). O principal desafio reside na operação em larguras de banda típicas da ordem de 200nm a 300 nm.

Referências

- [1] R. Baets and PE Lagasse, *Calculation of radiation loss in integrated-optic tapers and Y-junctions*, Appl. Opt. **21** (1982), no. 11, 1972–1978.
- [2] JP Berger, P. Haguenauer, P. Kern, K. Perraut, F. Malbet, I. Schanen, M. Severi, R. Millan-Gabet, and W. Traub, *Integrated Optics for Astronomical Interferometry IV. First Measurements of Stars*, Astronom. and Astrophys. **376** (2001), L31–L34.
- [3] JP Berger, K. Rousselet-Perraut, P. Kern, F. Malbet, I. Schanen-Duport, F. Reynaud, P. Haguenauer, and P. Benech, *Integrated Optics for Astronomical Interferometry -II First Laboratory White-Light Interferograms*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser **139** (1999), 173–177.
- [4] W. Burns and A. Milton, *Mode conversion in planar-dielectric separating waveguides*, IEEE Journal of Quant. Electr. **11** (1975), no. 1, 32–39.
- [5] A.N. Cox and CW Allen, *Allen's Astrophysical Quantities*, ch. 7, p. 146, AIP Press, 1999.
- [6] Reynaud F et al., *Current status on the contribution of silica fibers to stellar interferometry*, C.R. Académie des Sciences de Paris série IV (2001), no. t.2, 99–109.
- [7] V. Coullomb et al., *Development of an integrated optics chip for a multi-aperture fiber-linked interferometer*, 12th European Conference on Integrated Optics, 2005.
- [8] P. Haguenauer, J.P. Berger, K. Rousselet-Perraut, P. Kern, F. Malbet, I. Schanen-Duport, and P. Benech, *Integrated Optics for Astronomical Interferometry III. Optical Validation of a Planar Optics Two-Telescope Beam Combiner*, Applied Optics **39** (2000), no. 13, 2130–2139.

- [9] L. Hornak, *Polymers for Lightwave and Integrated Optics: Technology and Applications*, Marcel Dekker (1992).
- [10] Le Bouquin JB, *Imagerie par synthèse de ouverture optique*, Tèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 2005.
- [11] F. Ladouceur and J.D. Love, *Silica-based buried channel waveguides and devices*, Chapman & Hall, 1996.
- [12] F. Malbet, P. Kern, I. Schanen-Duport, J.P. Berger, K. Rousselet-Perraut, and P. Benech, *Integrated Optics for Astronomical Interferometry - I Concepts and Astronomical Applications*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser **138** (1999), 135–145.
- [13] A. Milton and W. Burns, *Mode coupling in optical waveguide horns*, IEEE J. of Quant. Electron. **13** (1977), no. 10, 828–835.
- [14] J.D. Monnier, *Optical Interferometry in Astronomy*, Rep. Prog. Phys. **66** (2003), no. 5, 789–857.
- [15] S.I. Najafi, *Introduction to glass integrated optics*, Artech House London, 1992.
- [16] K. Petermann, *Constraints for fundamental-mode spot size for broad-band dispersion-compensated single-mode fibres*, Electronics Letters **19** (1983), no. 18, 712–714.
- [17] Moreira PJ, *Óptica integrada em tecnologia sol-gel híbrido*, Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2006.
- [18] Marques PVS, *Silica-on-silicon integrated optics by flame hydrolysis deposition*, Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2000.
- [19] A. Quirrenbach, *Optical Interferometry*, Ann. Rev. Astron. and Astrophys. **39** (2001), 353–401.
- [20] A. Takagi, K. Jinguji, and M. Kawachi, *Design and fabrication of broad-band silica-based optical waveguide couplers with asymmetric structure*, IEEE J. Quant. Electr., **28** (1992), no. 4, 848–855.
- [21] M Takagi, A Jinguji K Kawachi, *Wavelength Characteristics of 2x2 Optical Channel-Type Directional Couplers with Symmetric or Non-symmetric Coupling Structures*, J. of Light. Technol. **10** (1992), no. 6.

REFERÊNCIAS

- [22] T. Tamir, *Integrated optics - topics in applied physics*, vol. 7, Springer-Verlag, 1975.

Anexos

Anexo A

Cálculo Numérico da Eficiência de Acoplamento

O código de MatLab usado para cálculo da eficiência de acoplamento entre a fibra óptica e o guia em canal é listado.

[illegible]

```
disp('Fibra usada para efeitos de cálculo:SMF28 da CorningGlass')
```



```
lambda=0;           % valor de arranque para a rotina de escolha do cdo
```

[illegible]



%
% Teste dos parâmetros de otimização para o acoplamento %

[illegible]

% PARÂMETRO EM ESTUDO : Lado do guia (1 guia)

```
theta=0;
```

x0=0 ;

```
***** Valores fronteira de teste *****
```

```
lmin=2; % testa entre os valores de lado entre 2 e 10 um
```

```
lmax=10;
```

$$dl = (l_{\max} - l_{\min}) / (N - 1);$$

```

##### Teste do parâmetro #####

```

```
pause(0.001);
```

```
for i=1:N
```

```
subplot (2,1,1);
```

```
l(i)=lmin+dl*(i-1);
```

```
eta l(i)=perda(r fibra,l(i),n guia,n clad,MFD,lambda,x0,theta);
```

% Gráfico de variação do parâmetro em estudo

```
perda dB l(i)=-10*log10(eta l(i));
```

figure(1)

```
subplot (2,1,1);
```

```
plot(1,perda dB 1, 'xr');
```

```
axis([0, lmax, 0, 10]);
```

```
xlabel('lado do guia quadrado (micrómetro)');
```

```
ylabel('Perda/dB');

```

```
title('Variação da perda com o lado do guia quadrado');
```

```
pause (0.001);
```

end

```
[1 quia, eta max 1]=maximo(1, eta 1)
```

figure (1)

```
subplot (2,1,2);
```

```
plot(l,eta l,'-r',l guia,eta max l,'kx');
```

```
xlabel('Lado do guia quadrado/um');
```

```
ylabel('Coeficiente de acoplamiento');
```

```
title('Variação do coeficiente de acoplamento com o lado do guia');
```

```
axis([0,lmax,0,1]);
```

pause ;

[illegible]

% PARÂMETRO EM ESTUDO : Deslocamento lateral da fibra (x0)

```
theta=0;
```

1 guia;

```

##### Valores fronteira de teste #####

```

```
x0min=-2*r fibra;
```

```
% testa entre os valores de deslocamento
```

```
x0max=2*r  fibra;
```

* zero e 2 vezes o raio da fibra

$$dx0 = (x0max - x0min) / N;$$

```

##### Teste do parâmetro #####

```

```

for i=1:N
    figure(2)
    subplot (2,1,1);
    x0(i)=x0min+dx0*(i-1);
    eta_x0(i)=perda(r_fibra,l_guia,n_guia,n_clad,MFD,lambda,x0(i),theta);

    % Gráfico de variação do parâmetro em estudo;
    perda_dB_x0(i)=-10*log10(eta_x0(i));
    plot(x0/r_fibra,perda_dB_x0,'xr');
    axis([-x0max/r_fibra,x0max/r_fibra,0,perda_dB_x0(1)*1.2]);
    xlabel('Deslocamento lateral da fibra normalizado x0/raio da fibra');
    ylabel('Perda/dB');
    title('Variação da perda com o deslocamento lateral da fibra');
    pause (0.001);

end

[x0_certo,eta_max_x0]=maximo(x0,eta_x0)
figure(2)
subplot (2,1,2);
plot(x0,eta_x0,'-r',x0_certo,eta_max_x0,'kx');
xlabel('Deslocamento lateral da fibra/um');
ylabel('Coeficiente de acoplamento');
title('Variação do coeficiente de acoplamento com o deslocamento da fibra');
axis([x0min,x0max,0,1]);
pause ;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      PARÂMETRO EM ESTUDO : Deslocamento angular da fibra (theta)
x0=0;
l_guia;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  Valores fronteira de teste  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

thetamin=-5*pi/180;           % testa entre os valores de +5° e -5°
thetamax=5*pi/180;           % zero e raio da fibra
dtheta=(thetamax-thetamin)/N;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  Teste do parâmetro  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=1:N
    figure(3)
    subplot (2,1,1);
    theta(i)=thetamin+dtheta*(i-1);
    eta_t(i)=perda(r_fibra,l_guia,n_guia,n_clad,MFD,lambda,x0,theta(i));

    % Gráfico de variação do parâmetro em estudo;
    perda_dB_t(i)=-10*log10(eta_t(i));
    plot(theta*180/pi,perda_dB_t,'xr');
    axis([thetamin*180/pi,thetamax*180/pi,0,perda_dB_t(1)]);
    xlabel('Deslocamento angular da fibra em graus');

```

```
ylabel('Perda/dB');  
title('Variação da perda com o deslocamento angular da fibra');  
pause (0.001);
```

end

```
[theta_certo,eta_max_t]=maximo(theta,eta_t)  
figure(3)  
subplot (2,1,2);  
plot(theta*180/pi,eta_t, '-r',theta_certo*180/pi,eta_max_t, 'kx');  
xlabel('Deslocamento angular da fibra da fibra/°');  
ylabel('Coeficiente de acoplamento');  
title('Variação do coeficiente de acoplamento com o deslocamento angular da fibra');  
axis([thetamin*180/pi,thetamax*180/pi,0,1]);  
pause ;
```

```

function eta=perda(r_fibra,l_guia,n_guia,n_clad,MFD,lambda,x0,theta)

format long
% Função que estima a perda por acoplamento entre guia quadrado e uma fibra
% usando aproximação gaussiana

% VARIÁVEIS ENTRADA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% r_fibra : raio da fibra (micrómetro)
% l_guia : lado do guia quadrado (micrómetro)
% n_guia : índice de refração do núcleo do guia
% n_clad : índice de refração da bainha do guia
% MFD : diâmetro modal do campo da fibra (definição de Peterman II)
% lambda : comprimento de onda (micrómetro)
% x0 : desvio lateral do campo na fibra -'offset' (micrómetro)
% theta : desvio angular do campo da fibra -'tilt angle' (radiano)
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% FUNÇÕES %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% gaussiana : determina o 'spot' para um guia quadrado
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Definição da janela de cálculo
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
dx=min(2*r_fibra,l_guia)/10; % 10 divisões da menor das partes
dy=dx;
Nx=30*floor(max(2*r_fibra,l_guia)/dx); % 30 vezes o n° de pontos na maior
Ny=30*floor(max(2*r_fibra,l_guia)/dy); % das partes

x=-Nx/2*dx:dx:Nx/2*dx;
y=-Ny/2*dy:dy:Ny/2*dy;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Determinação das gaussianas
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Sf=MFD/(2*sqrt(2)); % spot da gaussiana da fibra
Sg=gaussiana(l_guia,n_guia,n_clad,lambda); % spot da gaussiana do guia
k=2*pi/lambda;
Xf=x-x0; % x0 é o desvio lateral da
Yf=y; % gaussiana na fibra
Xg=2*x/l_guia;
Yg=2*y/l_guia;
E_fibra=exp(-Xf.^2/(2*Sf^2)).*exp(-Yf.^2/(2*Sf^2)).*cos(k*sin(theta).*x);
E_guia=exp(-Xg.^2/(2*Sg^2)).*exp(-Yg.^2/(2*Sg^2));

```

***** INTEGRAIS DE SOBREPOSIÇÃO *****

int_Ef_Eg=sum(sum(E_fibra.*E_guia));

int_Ef_2=sum(sum(E_fibra.^2));

int_Eg_2=sum(sum(E_guia.^2));

% Determinação da constante de acoplamento %

eta=int_Ef_Eg^2/(int_Ef_2*int_Eg_2); % Corresponde a eta= P/P0

```

function Spot=gaussiana(lado,n_guia,n_clad,lambda)

% VARIÁVEIS ENTRADA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% lado      : lado do guia quadrado (micrómetro)
% n_guia    : índice de refração do núcleo do guia
% n_clad    : índice de refração da bainha do guia
% lambda    : comprimento de onda (micrómetro)
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

margem=0.05; % com uma margem razoável o programa é mais rápido;
N=500;      % 500 pontos de teste
Smin=1/5;
Smax=10;
dS=(Smax-Smin)/N;

V=(2*pi/lambda)*(lado/2)*sqrt(n_guia^2-n_clad^2);

for i=1:100000
    S(i)=Smin+(i-1)*dS;
    A(i)=((2*V^2)/(sqrt(pi)))*exp(-1/(S(i)))*erf(1/S(i));
    B(i)=1/S(i);
    if i>1 & B(i-1)>A(i-1) & B(i)<A(i)+margem
        % encontrado o valor de S que satisfaz a equação
        Spot=S(i)*lado/2;
        break
    end
end

```

```
function [aa,maxB]=maximo(A,B)
```

```
[maxB,imax]=max(B);
```

```
aa=A(imax);
```

Anexo B

Determinação Numérica de Regime Monomodo

O código de MatLab usado para determinação da fronteira entre o regime monomodo e o regime multimodo de um guia em canal de secção quadrada é listado.

```
close all
clear all
```

```
% Programa que estabelece o limite do regime monomodo e multimodo de um
% guia quadrado de lado a
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               REGIME MONOMODO                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
N=50;           % N° de iterações a realizar
V_corte=2.405;   % valor de corte para o parâmetro V
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Gráfico nº1 : lado em função do comprimento de onda (delta fixo)          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
NA=[0.05,0.10,0.15];      % os valores de contraste de índice a
                           % testar estão entre 5% e 15%
```

```
lambdamin=1.0;             % Pesquisar para lambda entre
lambdamax=2.0;             % 1000 nm e 2000 nm (medida em micrometro)
dlambda=(lambdamax-lambdamin)/N;
```

```
lambda=linspace(lambdamin,lambdamax,N);
for j=1:length(NA)
    a_corte(:,j)=V_corte*lambda./(2*pi*NA(j));
end
```

```
figure (1)
plot(lambda,a_corte(:,1),'.k', lambda,a_corte(:,2),'+k',lambda,a_corte(:,3),'ok')
title('Regime monomodo e regime multimodo em função do comprimento de onda')
xlabel('comprimento de onda/um');
ylabel('Lado do guia quadrado/um');

legend('N_A = 0.05', 'N_A = 0.10', 'N_A = 0.15')
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Gráfico nº2: Salto de índice em função do lado (lambda fixo)              %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
lambda_fixo=[1.31,1.55];   % testar para 1.31 3 1.55 micrómetros

amin=2;                    % O lado varia entre 2 e 10 micrómetros
amax=10;

a=linspace(amin,amax,N)
```

```

for j=1:length(lambda_fixo)
    NA_corte(:,j)=V_corte*lambda_fixo(j)/(2*pi*a);
end

figure(2)
plot(a,NA_corte(:,1),'.k', a,NA_corte(:,2),'+k')
title('Regime monomodo e regime multimodo em função da largura do guia')
xlabel('Lado do guia quadrado/\mu m');
ylabel('NA');
legend(['\lambda=',num2str(lambda_fixo(1)*1000,4),'nm';'\lambda=',num2str(lambda_fixo(2)*1000,4),'nm']);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
resposta=' ';

    resposta=input('Deseja ver dados de fabricação?(1-Sim / 0-Não)');

if resposta==1

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %                                CARREGAMENTO DOS DADOS DE FABRICAÇÃO                                %
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    load sol_gel.dat

    perc_zirconio=sol_gel(:,1);
    ng633=sol_gel(:,2);
    ng1302=sol_gel(:,3);
    ng1553=sol_gel(:,4);

    clear sol_gel

    load substractos.dat

    substracto=(['Soda-lime ','Borosilicato','Sílicio ']);
    ns633=substractos(:,1);
    ns1302=substractos(:,2);
    ns1553=substractos(:,3);

    clear substractos

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    for i=1:length(perc_zirconio)

        dn1302(i)=sqrt(ng1302(i)^2-ns1302(1)^2);
        dn1553(i)=sqrt(ng1553(i)^2-ns1553(1)^2);

    end

    aa=[amin,amax];

    figure(3)
    disp('1302 nm')
    plot(a,NA_corte(:,1),'-b',aa,[dn1302(1),dn1302(1)],'--',aa,[dn1302(2),dn1302(2)],'--',aa,[dn1302(3),dn1302(3)],'--',aa,[dn1302(4),dn1302(4)],'--',aa,[dn1302(5),dn1302(5)],'--',aa,[dn1302(6),dn1302(6)]);

```

```
dn1302(5)], '--')
    title('Parametros de fabricação a 1302 nm')
    xlabel('Lado do guia quadrado/um');
    ylabel('NA');
    legend('Corte', 'Soda-Lime+Zr(5%)', 'Soda-Lime+Zr(10%)', 'Soda-Lime+Zr(20%)', 'Soda-
Lime+Zr(30%)', 'Soda-Lime+Zr(40%)')

    figure(4)
    disp('1510 nm')
    plot(a, NA_corte(:,2), '-g', aa, [dn1553(1), dn1553(1)], '--', aa, [dn1553(2), dn1553(
2)], '--', aa, [dn1553(3), dn1553(3)], '--', aa, [dn1553(4), dn1553(4)], '--', aa, [dn1553(5),
dn1553(5)], '--')
    title('Parametros de fabricação a 1553 nm')
    xlabel('Lado do guia quadrado/um');
    ylabel('NA');
    legend('Corte', 'Soda-Lime+Zr(5%)', 'Soda-Lime+Zr(10%)', 'Soda-Lime+Zr(20%)', 'Soda-
Lime+Zr(30%)', 'Soda-Lime+Zr(40%)')
else
    disp('A terminar o programa...')
end
```

Anexo C

Procedimentos de Microfabricação

São descritos os procedimentos de microfabricação usados para produção de guias em canal por tecnologia sol-gel híbrido.

Preparação de Dispositivos em Sol-Gel

Corte dos substratos de "Soda-Lime"

[sala de corte 1 hora]

1. Preparar a máquina de corte (ligar à corrente e encher o depósito com água);
2. Introduzir no fundo do suporte o vidro de protecção (vidro espesso);
3. Colocar no suporte das lamelas, até 5 camadas de lamelas intercaladas por papel absorvente humedecido (1 folha);
4. Colocar a parte superior do suporte e ajustar os parafusos;
5. Colocar o suporte no torno e verificar se a lâmina conseguirá cortar todas as lamelas;
6. Accionar o motor de rotação e bomba de água (ambos na posição 4);
7. Efectuar o corte suportando a lâmina para que o corte seja suave (o suporte deve ser movimentado lentamente para a frente e para trás).

Notas:

- A limpeza da máquina é efectuada com papel absorvente e com um esguicho para retirar a água do depósito;
- Durante o corte, na posição mais baixa, a lâmina deve ficar na horizontal;
- O ajuste dos parafusos de suporte deve ser feito até que seja visível alguma água a sair na parte superior.

• A – Preparação das Soluções

[sala limpa 2 horas]

Material

- Frasco pequeno e frasco médio
- Micropipetas de 1 mL e 5 mL
- Barras de agitação magnética
- Agitador magnético

Reagentes

- HCl 0.1 mol.dm⁻³
- Etanol (C₂H₅OH) EtOH
- Ácido metacrílico (C₃H₅COOH) MAA
- Metacriloxipropiltrimetoxisilano MAPTMS
- Tetrapropóxido de zircônio (Zr(OC₃H₇)₄) TPZ

Procedimento

Solução A – Estabilização do TPZ

Adicionar os reagentes na ordem indicada no frasco de 5 mL:

Ordem	Reagente	V/mL		
		40% Zr	30% Zr	20% Zr
1	EtOH	1.16	0.870	0.580
2	TPZ	2.96	2.22	1.48
3	MAA	0.563	0.423	0.283

Notas:

- Usar micropipetas com o menor volume possível para medir os volumes decrescendo o volume até ao valor indicado;
- O TPZ deve ser adicionado com a maior brevidade possível, pois é higroscópico;
- A agitação deve ser mantida na posição 4 durante todo o processo (com agitador);
- Após a adição do último reagente aguardar 60 minutos.

Solução B – Pré-hidrólise do MAPTMS

Adicionar os reagentes na ordem indicada no frasco de 10 mL:

Ordem	Reagente	V/mL
1	EtOH	2.00
2	MAPTMS	4.00
3	HCl	0.230

Notas:

- Usar micropipetas com o menor volume possível para medir os volumes, decrescendo o volume até ao valor indicado;
- Aguardar 15 minutos em agitação após a adição do último reagente.

Dopagem do MAPTMS

- 1 . Adicionar a solução A à solução B, retirando o magnete do frasco A (TPZ), e aumentando a agitação até à posição 6;
2. Aguardar 20 minutos;
3. Adicionar lentamente 0.220 mL de HCl à solução em agitação elevada (posição 6);
4. Aguardar 30 minutos.

Notas:

- Lavar o frasco da solução A com etanol ou acetona;
- Retirar o magnete do frasco com outro magnete maior.

B – Deposição e Cura

[sala limpa 1,5 horas]

Material

- Seringa 1.0 mL
- Filtro de 0.2 μm
- Lamelas (soda-lime)
- Placa apropriada para ir ao forno

Procedimento

1. Transferir a solução para a *hotte* e ligar a rotação e a bomba de vácuo;
2. Posicionar a lamela no suporte;
3. Encher a seringa com 0.20 mL da solução de Sol-Gel preparada;
4. Colocar o filtro na seringa;
5. Retirar o ar da seringa e do filtro;
6. Accionar a bomba de vácuo e depositar o Sol-Gel;
7. Iniciar a contagem de tempo;
8. Efectuar rotações segundo a tabela abaixo;

Instante	Duração/s	Rotação
30 s	1	Baixa
60 s	1	Baixa
1 min : 30 s	5	Baixa
2 min : 00 s	60	Alta

Rotação: *Baixa = 2 voltas ao ponteiro de regulação*

Alta = aumentar 1 volta e meia à baixa rotação

9. Recolher as amostras para a placa de ir ao forno;
10. Colocar no forno à temperatura de 100°C durante 30 minutos.

C – Exposição e Revelação

[sala do laser 30 min]

Material

- Óculos de protecção (usar em todo este procedimento)
 - Máscaras
 - Lamelas com filme de Sol-Gel curado (após ir ao forno)
 - Etanol
 - Frasco de plástico
1. Efectuar o processo de arranque do laser (abrir torneiras por ordem numérica, ligar chave vermelha, ligar chave manual);
 2. Iniciar o computador (Aplicação LPX3 no MSDOS);
 3. Introduzir comprimento de onda e energia do impulso ($\lambda=248\text{nm}$ $f=10\text{ Hz}$, $P=10\text{mJ}$);
 4. Verificar alinhamento dos espelhos do laser por reflexão no fim do percurso óptico com auxílio de um espelho;
 5. Colocar a lamela com o filme para cima e a máscara com o filme para baixo e ajustar com auxílio dos parafusos;
 6. Efectuar exposição de 30s;
 7. Retirar do suporte e efectuar a revelação com etanol no frasco de plástico;
 8. Lavar os guias com água corrente.

Notas:

- Se o programa de controlo não medir a energia do impulso usar o detector e o computador da sala exterior (*My Computer > Andrei > Application... (Labview)*);
- Usar óculos de protecção em todo o processo na sala do laser.

Faculdade de Ciências do Porto
Biblioteca do Departamento de Física