UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DEE)

[MOD-PH07] Grades de Bragg e Guias Subcomprimento (SWG)

Reflexão Distribuída, Grating Couplers e Metamateriais de Rytov

Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

LabTel — Laboratório de Telecomunicações | IN-Foton





Sumário do Módulo [MOD-PH07]

1. Física da Reflexão e Condição de Bragg
2. Resposta Espectral e Faixa de Parada
3. Topologias de Grades em Silício (SOI)
4. Acopladores Verticais (Grating Couplers)
5. Metamateriais Subcomprimento (SWG)
6. Aplicações no Consórcio Smart-PSoC

Interferência Coerente em Meios Periódicos

O Princípio da Reflexão Distribuída

Uma perturbação periódica de permissividade $\Delta\epsilon(z)$ com período Λ gera micro-reflexões contínuas. Quando as ondas refletidas interferem construtivamente para trás, a onda incidente sofre reflexão total em uma banda estreita centrada em λ_B.

Conservação de Momento (Vetor K):

$$\beta - (-\beta) = K = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

$$2\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \implies 2\left(\frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_B}\right) = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

Condição de Bragg de 1ª Ordem

$$\lambda_B = 2\, n_{\text{eff}}\, \Lambda$$

- Em SOI ($n_{\text{eff}} \approx 2{,}45$, $\lambda_B = 1550\,\text{nm}$):

$$\Lambda = \frac{1550}{2 \times 2{,}45} \approx 316\,\text{nm}$$

Modos Acoplados Contra-Direcionais

Equações Diferenciais de Acoplamento Contra-Direcional

Expandindo o campo em onda progressiva $A(z)e^{-i\beta_0 z}$ e regressiva $B(z)e^{+i\beta_0 z}$:

$$\frac{dA}{dz} = -i\Delta\beta A - i\kappa B, \qquad \frac{dB}{dz} = +i\Delta\beta B + i\kappa A$$

onde $\Delta\beta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda}$ é o descasamento e κ o acoplamento por unidade de comprimento.

Condições de Contorno ($z \in [0, L]$):

- Entrada em $z = 0$: $A(0) = A_0$.
- Sem reflexão externa em $z = L$: $B(L) = 0$.

Parâmetro de Propagação s:

$$s = \sqrt{\kappa^2 - \Delta\beta^2}$$

- Se $|\Delta\beta| < \kappa \implies s \in \mathbb{R}$ (decaimento).

Refletividade Espectral e Faixa de Parada (Stopband)

Equação Analítica da Refletividade $R(\lambda)$

Resolvendo as equações com a condição de contorno $B(L) = 0$:

$$R(\lambda) = \left| \frac{B(0)}{A(0)} \right|^2 = \frac{\kappa^2 \sinh^2(sL)}{s^2 \cosh^2(sL) + \Delta\beta^2 \sinh^2(sL)}$$

Pico de Reflexão ($\lambda = \lambda_B$):

$$R_{\max} = \tanh^2(\kappa L)$$

- Para $\kappa L = 3 \implies R_{\max} \approx 99{,}0\%$.
- Para $\kappa L = 4 \implies R_{\max} \approx 99{,}8\%$.

Largura da Faixa ($\Delta\lambda_{\text{Bragg}}$):

$$\Delta\lambda_B = \frac{\lambda_B^2}{\pi n_g} \sqrt{\kappa^2 + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2}$$

- Grade longa ($L \gg \pi/\kappa$): $\Delta\lambda_B \approx \frac{\lambda_B^2 \kappa}{\pi n_g}$.
- Banda cresce com o acoplamento κ.

Apodização de Grades de Bragg

Problema dos Lóbulos Secundários (*Sidelobes*)

Grades uniformes com corte abrupto geram oscilações espúrias (sidelobes a -10 dB), causando diafonia em sistemas DWDM densos.

Conceito de Apodização:

- Modulação suave de $\kappa(z)$ ao longo do comprimento físico L.
- Perfil Gaussiano simétrico:

$$\kappa(z) = \kappa_0 e^{-a(z-L/2)^2/L^2}$$

- Perfis Blackman e Kaiser.

Ganhos de Desempenho:

- Supressão de sidelobes para níveis inferiores a -35 dB.
- Transmissão fora de banda limpa.
- Essencial para filtros Add-Drop de alta seletividade.

Topologias I: Corrugações de Parede e Superfície

1. Corrugação Lateral de Parede

Modulação na largura:
$W(z) = W_0 \pm \Delta W$

- Fabricação em passo único de corrosão plena (220 nm).
- κ ajustado pela modulação ΔW (5 a 40 nm).
- Sensível à rugosidade de borda.

2. Corrugação Superficial de Topo

Corrosão rasa: profundidade Δh

- Modulação de altura ($h = 220$ nm $\rightarrow$ 150 nm).
- Requer segundo passo litográfico.
- Excelente uniformidade e baixa perda de espalhamento lateral.

Diretriz: Corrugações de parede são o padrão de prototipagem MPW pelo baixo custo.

Topologias II: Postes Dielétricos e Grade SWG

3. Postes Dielétricos Laterais

Perturbação evanescente externa

- Postes nanométricos isolados paralelos ao guia central liso.
- O núcleo não possui corrugações, eliminando perdas de propagação.
- Acoplamento κ controlado pelo gap lateral.

4. Grade Subcomprimento (SWG)

Segmentação periódica total

- Blocos alternados de silício e analito/óxido.
- Transição entre reflexão de Bragg e regime de meio efetivo.
- Máxima sensibilidade refratométrica para biosensores.

Destaque: Grades SWG viabilizam engenharia de dispersão sem precedentes.

Princípio de Difração de Bragg Fora do Plano

Casamento de Momento para Acoplamento Fibra-Chip Quase-Vertical

Grades com passo $\Lambda \approx 600$ a 650 nm difratam a luz guiada para fora do chip em direção a uma fibra monomodo posicionada com ângulo $\theta \approx 8^\circ$ a 10°:

$$\beta - k_0\, n_{\text{top}}\, \sin\theta = m\, K = m\, \frac{2\pi}{\Lambda}, \qquad (m = 1)$$

Vantagens Industriais:

- Dispensa clivagem e polimento óptico.
- Teste automatizado de lâminas completas (*wafer-scale testing*).
- Alinhamento com tolerância de $\pm 2\,\mu$m.

Desafios de Engenharia:

- Radiação para o substrato ($\sim 40\%$ de perda para baixo).
- Eficiência típica: $-3{,}0$ a $-4{,}5$ dB/porta.
- Largura de banda: 35 a 40 nm a -1 dB.

Estratégias de Alta Eficiência em Grating Couplers

Apodização de Passo (Pitch)

- Variação gradual de $\Lambda(z)$ e do duty cycle $\eta(z)$.
- Molda o feixe emitido para perfil Gaussiano da fibra SMF-28 ($w_0 \approx 10{,}4\,\mu$m).
- Descasamento modal reduzido para $< 0{,}2$ dB.

Espelhos Refletores Inferiores

- Inserção de espelho DBR ou filme metálico (Al/Au) abaixo do BOX.
- Reflete a fração inferior de volta para a fibra no topo.
- Eficiência recorde: $< 1{,}0$ dB/porta ($> 80\%$).

Diretriz Prática: Em MPW padrão, grades uniformes com corrosão de 70 nm e $\theta = 8^\circ$ são a solução mais adotada.

O Regime Sub-Difrativo ($\Lambda < \lambda_0/2n_{\text{eff}}$)

Transição de Regime Eletromagnético

Quando o período estrutural Λ torna-se muito menor que o meio comprimento de onda ($\Lambda \ll \lambda_0/2n_{\text{eff}}$), as ordens de difração de Floquet-Bloch ($m \neq 0$) tornam-se evanescentes. A luz propaga-se sem reflexão nem espalhamento, como em um **meio contínuo artificial**.

Fator de Preenchimento (*Duty Cycle*):

$$\eta = \frac{a}{\Lambda} \in [0, 1]$$

- a: largura do bloco de silício.
- $b = \Lambda - a$: vão preenchido por cladding.

Vantagens Disruptivas:

- Síntese de índice $n_{\text{eff}} \in [1{,}45, 3{,}45]$.
- Engenharia de dispersão geométrica.
- Interação direta com analito líquido/gasoso.

Teoria do Meio Efetivo de Rytov (1955)

Formulação Eletromagnética Fundamental de Sergei M. Rytov

A continuidade das componentes tangenciais e normais de **E** e **D** governa as permissividades efetivas:

Polarização TE ($E \parallel$ lamelas):

$$\varepsilon_{\parallel}^{(0)} = \eta\,\varepsilon_{\mathrm{Si}} + (1-\eta)\,\varepsilon_{\mathrm{clad}}$$

- **Média Aritmética:** E tangencial contínuo.

Polarização TM ($E \perp$ lamelas):

$$\frac{1}{\varepsilon_{\perp}^{(0)}} = \frac{\eta}{\varepsilon_{\mathrm{Si}}} + \frac{1-\eta}{\varepsilon_{\mathrm{clad}}}$$

- **Média Harmônica:** D normal contínuo.

Birrefringência de Forma Gigante ($\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$)

Pela desigualdade de Cauchy-Schwarz, $\varepsilon_{\parallel} > \varepsilon_{\perp}$, resultando em uma birrefringência induzida de $\Delta n \approx 0{,}80$, superior à de qualquer cristal natural.

Tapers Adiabáticos SWG e Casamento de Impedância

Transição Sem Reflexão entre Guias Sólidos e Guias SWG

A junção abrupta entre um guia de silício sólido (450 nm) e um guia SWG provoca reflexão por descasamento de impedância de onda.

Taper Invertido (*Fishbone Taper*):

- Afunilamento do núcleo sólido com expansão síncrona dos blocos SWG.
- Variação adiabática de $\eta = 1 \rightarrow \eta_{\text{SWG}}$.
- Comprimento $L_{\text{taper}} \approx 10$ a $20\,\mu$m.

Desempenho Alcançado:

- Perda de inserção $< 0{,}05$ dB/transição.
- Reflexão parasita $R < -40$ dB em banda ultralarga (> 200 nm).
- Pureza espectral para biosensores.

Aplicações: Sensores BiMW-DTP e Redes Neurais

Sensores BiMW-DTP (HIT Shenzhen / UFES)

- Engenharia de dispersão em guias fishbone SWG operando no **Ponto de Inflexão Dispersivo** (DTP).
- Sensibilidade refratométrica $S_\lambda > 10.000$ nm/RIU.
- Rejeição de modo comum térmico (CMRR).

Redes Neurais Ópticas (Univ. de Trento)

- Divisores e interconexões SWG para circuitos neuromórficos aterminais.
- Processadores matriciais 4×4 e $N \times N$ com redução de área de 60%.
- Mitigação de diafonia intermodal.

Sinergia Internacional

A pesquisa na UFES une-se à fabricação no HIT Shenzhen e às redes neurais ópticas da Univ. de Trento.

Síntese do Módulo e Transição

Conceitos Fundamentais Fixados [MOD-PH07]

- A condição de Bragg ($\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$) rege espelhos dielétricos com $R > 99\%$.
- Grating Couplers utilizam difração fora do plano para teste em lâmina sem clivagem.
- Metamateriais SWG operam no regime de Rytov como meios contínuos sem difração.

Relação com o Próximo Módulo [MOD-PH08]

No módulo seguinte, ingressaremos nos componentes ativos: **Moduladores e Chaves Eletro-Ópticas em Silício**, explorando efeitos de dispersão de plasma por injeção/depleção de portadores livres e moduladores Mach-Zehnder rápidos.