UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DEE)

[MOD-PH05] Dispositivos Passivos em Fotônica Integrada

Panorama Conceitual, Modelagem Dispositivo a Dispositivo, Tabela Comparativa e Topologias

Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

LabTel — Laboratório de Telecomunicações | IN-Foton





Sumário do Módulo [MOD-PH05]

1. Panorama dos Componentes Passivos
2. Curvas de Baixa Perda e Curvas Euler
3. Transições e Tapers Modais
4. Divisores: Acopladores vs. MMIs
5. Interferômetros e Filtros Ressonantes
6. Acopladores Fibra-Chip
7. Tabela Comparativa e Conclusões

O Papel dos Dispositivos Passivos em PICs

Definição e Relevância em Silício (SOI 220 nm)

Componentes passivos são estruturas ópticas estáticas que realizam roteamento, divisão e combinação de potência, casamento modal, filtragem espectral e acoplamento fibra-chip sem requerer injeção de portadores.

Desafios Críticos de Engenharia:

- **Perdas de Inserção (IL):** Minimização de radiação em curvas e espalhamento por rugosidade superficial ($< 0{,}1$ dB/dispositivo).
- **Tolerância de Fabricação:** Robustez a variações de litografia DUV (± 10 nm) e espessura da lâmina de silício (± 5 nm).
- **Sensibilidade Térmica (dn/dT):** Silício possui elevado coeficiente termo-óptico ($1{,}86 \times 10^{-4}$ K^{-1}), deslocando fases.

Física da Perda em Curvas: Radiação e Descasamento

Mecanismos de Perda em Dobras

1. **Radiação ($P_{\mathbf{rad}}$):** No cladding externo ($r > R$), a velocidade tangencial atinge c/n_{clad}, convertendo campo evanescente em radiação.
2. **Transição (ΔModo):** Descasamento espacial entre o modo simétrico do guia reto e o modo deslocado centrifugamente.

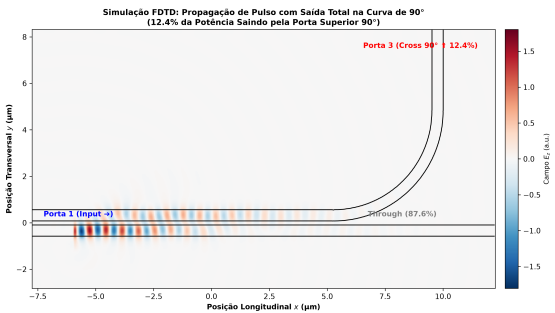


Figura 1: FDTD de curva 90° em SOI.

Curvas Circulares vs. Curvas Euler Adiabáticas

A Vantagem da Curva Euler

Enquanto a curva circular impõe salto de curvatura ($\kappa = 1/R$) na junção, a curva Euler varia linearmente com o comprimento de arco s:

$$\frac{1}{R(s)} = \frac{s}{A^2}$$

Benefícios em Silício:

- Elimina excitação de modos superiores e de radiação.
- Permite raio efetivo $R \approx 5\,\mu$m em SOI sem penalidade de perda ($< 0{,}02$ dB/curva).
- Maximização da densidade de integração.

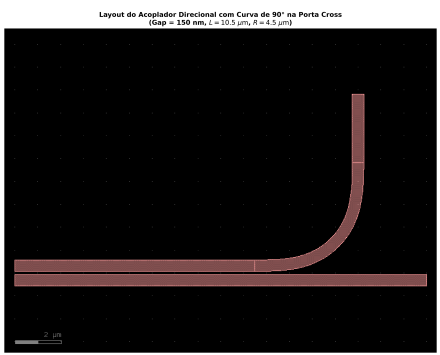


Figura 2: Leiaute de curva otimizada 90°.

Conversores de Modo e Critério de Adiabaticidade

Função dos Tapers em PICs

Adaptam a largura do guia (ex.: de 450 nm monomodo para 1 a 3 μm em guias largos de baixa perda) sem excitar ordens superiores.

Critério de Adiabaticidade de Love

O ângulo local de abertura $\theta(z)$ do taper deve satisfazer:

$$\theta(z) \ll \frac{\lambda_0}{2\, w(z)\, n_{\text{eff}}(z)}$$

Perfis Comuns de Taper:

- **Linear:** Simples, mas requer comprimentos maiores ($L > 15\,\mu$m).
- **Parabólico e Exponencial:** Comprimento compacto ($L \approx 5$–$8\,\mu$m) mantendo perdas $< 0{,}05$ dB.

Acopladores Direcionais: Topologia e Limitações

Princípio (Baseado na CMT)

Dois guias monomodo paralelos separados por gap g. Comprimento para divisão 3 dB:

$$L_{3\text{dB}} = \frac{\pi}{4\kappa(g)}$$

Limitação Crítica:

- Extrema sensibilidade ao gap submicrométrico ($\Delta g = 10$ nm $\implies \Delta P > 15\%$).
- Banda estreita pela dispersão de $\kappa(\lambda)$.

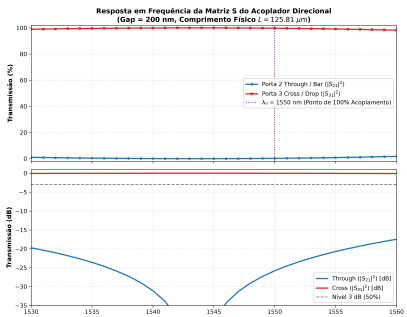


Figura 3: Espectro de acoplador direcional.

Divisores MMI: O Princípio da Autoimagem de Talbot

Física da Autoimagem (Self-Imaging)

Em uma seção multimodo larga de largura W_{mmi}, a interferência dos modos suportados reproduz imagens perfeitas do campo de entrada em distâncias periódicas governadas pelo comprimento de batimento L_π:

$$L_\pi = \frac{4\, n_{\text{eff}}\, W_{\text{mmi}}^2}{3\lambda_0}$$

Topologias Canônicas:

- **MMI** 1×2**:** $L = \frac{3}{8} L_\pi$. Divisão 50:50 simétrica em fase (0°).
- **MMI** 2×2**:** $L = \frac{3}{4} L_\pi$. Divisão 50:50 com defasagem de 90°.
- **Vantagem:** Imunidade excepcional a variações de litografia e temperatura.

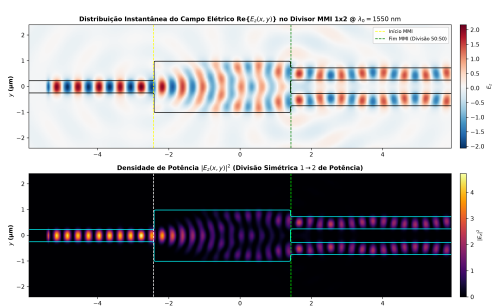


Figura 4: Propagação em MMI 1×2.

Interferômetro Mach-Zehnder (MZI)

Arquitetura e Resposta Espectral

Dois divisores interconectados por braços com diferença de caminho óptico ΔL:

$$T(\lambda) = \cos^2\left(\frac{\pi n_g \Delta L}{\lambda}\right)$$

Métricas de Projeto:

- **Faixa Espectral Livre (FSR):**

$$\Delta\lambda_{\text{FSR}} = \frac{\lambda_0^2}{n_g\,\Delta L}$$

- **Razão de Extinção (ER):**
  > 30 dB em braços balanceados.

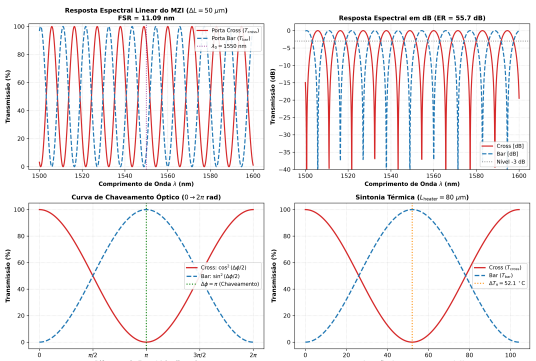


Figura 5: Espectro e sintonia em MZI.

Microrressonadores em Anel (Ring Resonators)

Física da Ressonância e Parâmetros

Interferência construtiva ao fechar volta na cavidade de raio R:

$$2\pi R\, n_{\text{eff}} = m\, \lambda_0$$

Figuras de Mérito:

- **FSR:** $\Delta\lambda_{\text{FSR}} = \frac{\lambda_0^2}{2\pi R n_g}$.
- **Fator de Qualidade (Q):** $Q = \frac{\lambda_0}{\text{FWHM}} \approx 10^4$ a 10^6.
- **Finesse ($\mathcal{F}$):** $\mathcal{F} = \frac{\text{FSR}}{\text{FWHM}}$.
- **Acoplamento Crítico:** Perda interna a iguala transmissão r ($r = a$).

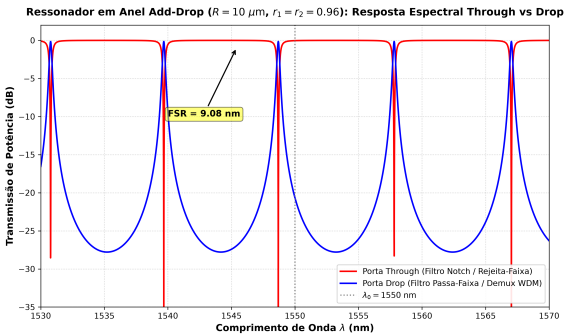


Figura 6: Transmissão em anel óptico.

Grating Couplers vs. Edge Couplers

O acoplamento entre fibras monomodo ($\sim$10 μm) e guias de silício (450×220 nm) é um desafio essencial de embalagem:

Grating Couplers (Acoplador Vertical)

- Difração fora do plano ($\theta \approx 8°$–$10°$).
- **Vantagem:** Teste em lâmina inteira (*wafer-scale*) sem corte.
- **Desvantagem:** Banda estreita (35–40 nm) e perda moderada (2,5–4 dB).

Edge Couplers (Acoplador de Borda)

- Taper invertido na faceta do chip.
- **Vantagem:** Banda ultralarga (> 100 nm) e perda ultrabaixa (< 1 dB).
- **Desvantagem:** Exige clivagem/polimento óptico da faceta e alinhamento 3D ativo.

Tabela Comparativa Geral de Dispositivos Passivos

Dispositivo	**Princípio Físico**	**Perda Típica**	**Largura Banda**	**Tolerância Fab.**	**Aplicação Principal**
Curva Euler	Curvatura linear $1/R \propto s$	$< 0{,}02$ dB	Ultralarga (> 200 nm)	Alta	Roteamento compacto em PICs
Taper Adiabático	Expansão modal de Love	$< 0{,}05$ dB	Ultralarga (> 200 nm)	Alta	Casamento de modos e guias largos
Acoplador Direcional	Acoplamento evanescente	$< 0{,}2$ dB	Estreita (20–40 nm)	Baixa ($\Delta g < 10$ nm)	Divisão de potência 50:50 e taps
Divisor MMI	Autoimagem de Talbot	$< 0{,}3$ dB	Larga (> 100 nm)	Muito Alta	Divisão/combinação 3 dB robusta
Interferômetro MZI	Interferência de 2 feixes	$< 0{,}5$ dB	Periódica (FSR)	Média	Modulação, chaves e sensores
Ressonador em Anel	Ressonância de cavidade	$< 0{,}8$ dB	Ultrarresonat. ($\Delta\lambda < 1$ nm)	Baixa (sensível à temp.)	Filtros WDM e sensores de índice
Grating Coupler	Difração de Bragg vertical	2,5–4,0 dB	Média (35–40 nm)	Média	Teste de lâmina (wafer-scale testing)
Edge Coupler	Taper invertido spot-size	$< 1{,}0$ dB	Ultralarga (> 120 nm)	Baixa (alinhamento 3D)	Embalagem óptica de alta performance

Conclusão e Próximos Passos

Síntese do Módulo [MOD-PH05]

- Dispositivos passivos formam a fundação sobre a qual moduladores e circuitos ópticos complexos são construídos.
- A escolha entre acopladores direcionais e divisores MMI envolve um trade-off direto entre pegada de área e tolerância de processo.
- Curvas Euler revolucionaram a densidade de integração ao mitigar perdas de radiação em raios sub-10 micrômetros.

Relação com o Próximo Módulo [MOD-PH06]

No módulo seguinte, aprofundaremos nos **Microrressonadores em Anel e Cavidades Ópticas Integradas**, explorando recirculação óptica, fator de qualidade Q e filtros Add-Drop.