UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DEE)

[MOD-PH06] Microrressonadores em Anel e Cavidades Ópticas Integradas

Modelagem Analítica de Yariv, Regimes de Acoplamento, Fator Q, Filtros Add-Drop e Aplicações

Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

LabTel — Laboratório de Telecomunicações | IN-Foton





Sumário do Módulo [MOD-PH06]

1. Fundamentos e Topologias de Cavidades
2. Formalismo Matricial de Yariv
3. Regimes de Acoplamento
4. Métricas de Desempenho: FSR, FWHM e Q
5. Filtros Add-Drop de Quatro Portas
6. Efeitos Práticos: Temperatura e Não Linearidade
7. Aplicações em Fotônica Integrada

Cavidades Ópticas em Silício vs Fabry-Perot

Conceito de Cavidade Recirculante em Guia de Onda

Diferente de cavidades Fabry-Perot convencionais (que requerem espelhos refletores nas facetas), os microrressonadores em anel (*Micro-Ring Resonators* — MRR) confinam e recirculam a luz continuamente por reflexão interna total ao longo de uma trajetória fechada de perímetro $L = 2\pi R$.

Vantagens em SOI 220 nm:

- Pegada ultracompacta ($R \sim 3$ a $20\,\mu$m).
- Ausência de espelhos facetados ou cortes transversais.
- Fabricação monolítica planar em passo único de corrosão.

Topologias Canônicas:

- **All-Pass (1 guia):** Filtro notch (rejeição de banda no Through).
- **Add-Drop (2 guias):** Filtro passa-faixa no Drop e rejeição no Through.

Topologias Fundamentais: All-Pass e Add-Drop

Configuração All-Pass (Notch Filter)

- Um único guia de acesso reto acoplado evanescentemente ao anel.
- Porta de Entrada (E_{in}) e Porta Through (E_{th}).
- Em ressonância, a luz interfere destrutivamente com a onda incidente no Through.

Ideal para modulação e sensores.

Configuração Add-Drop (Filtro 4 Portas)

- Dois guias de acesso paralelos acoplados à cavidade circular.
- 4 Portas: **Input**, **Through**, **Drop** e **Add**.
- Extrai seletivamente o comprimento de onda ressonante para a porta Drop.

Base para multiplexação DWDM e roteamento.

Matriz de Transferência da Região de Acoplamento

Formalismo de Yariv para Acoplador 2×2 Direcional

A interação na região de acoplamento com perdas negligenciáveis é modelada por uma matriz unitária relacionando as amplitudes de campo:

$$\begin{bmatrix} E_{\text{pass}} \\ E_{\text{ring}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & i\kappa \\ i\kappa & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{in}} \\ E_{\text{rt}} \end{bmatrix}$$

onde r é o coeficiente de transmissão direta, κ é o coeficiente de acoplamento cruzado, satisfazendo $r^2 + \kappa^2 = 1$.

Condição de Propagação na Cavidade de Ida e Volta:

$$E_{\text{rt}} = a\, e^{i\phi}\, E_{\text{ring}}$$

com atenuação de ida e volta $a = \exp(-\alpha L/2)$ e fase acumulada $\phi = \beta L = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} L$.

Solução de Auto-consistência: Resposta All-Pass

Equação da Transmissão Complexa ($E_{\text{pass}}/E_{\text{in}}$)

Substituindo E_{rt} nas relações matriciais e resolvendo para a auto-consistência:

$$\frac{E_{\text{pass}}}{E_{\text{in}}} = \frac{r - a\,e^{i\phi}}{1 - ra\,e^{i\phi}}$$

Transmitância de Potência $T_{\text{all-pass}}(\phi)$:

$$T(\phi) = \left|\frac{E_{\text{pass}}}{E_{\text{in}}}\right|^2 = \frac{r^2 - 2ra\cos\phi + a^2}{1 - 2ra\cos\phi + (ra)^2}$$

- **Fora de ressonância ($\phi = (2m+1)\pi$):** $\cos\phi = -1 \implies T \approx 1$.
- **Na ressonância ($\phi = 2m\pi$):** $\cos\phi = +1 \implies T_{\text{res}} = \frac{(r-a)^2}{(1-ra)^2}$.

Acoplamento Crítico, Subacoplamento e Sobreacoplamento

O comportamento na ressonância ($\phi = 2m\pi$) depende da relação entre transmissão r e perdas a:

Subacoplamento

$r > a$ $(\kappa^2 < 1 - a^2)$

- Perdas superam acoplamento.
- Extinção incompleta.
- Variação de fase $< 2\pi$.

Acoplamento Crítico

$r = a$ $(\kappa^2 = 1 - a^2)$

- Potência acoplada = perdas.
- $T_{\mathbf{res}} = 0$ **(extinção total)**.
- Máximo acúmulo interno.

Sobreacoplamento

$r < a$ $(\kappa^2 > 1 - a^2)$

- Acoplamento domina.
- Linha mais larga.
- Salto de fase de 2π.

Diretriz de Projeto: Para máxima profundidade de modulação e filtros notch com rejeição > 30 dB, projeta-se o gap de acoplamento para garantir rigorosamente $r = a$.

Intervalo Espectral Livre (FSR) e Largura de Linha (FWHM)

Intervalo Espectral Livre (FSR)

Espaçamento espectral entre ressonâncias adjacentes ($\Delta m = 1$):

$$\mathrm{FSR}_\lambda \approx \frac{\lambda_0^2}{n_g L} = \frac{\lambda_0^2}{2\pi R\, n_g}$$

- $n_g = n_{\mathrm{eff}} - \lambda_0 \frac{dn_{\mathrm{eff}}}{d\lambda}$ (índice de grupo).
- Em SOI ($R = 5\,\mu\mathrm{m}$, $n_g \approx 4{,}2$):

$$\mathrm{FSR} \approx \frac{(1{,}55)^2}{2\pi(5)(4{,}2)} \approx 18{,}2\,\mathrm{nm}$$

Largura a Meia Altura (FWHM / $\delta\lambda$)

Largura espectral a -3 dB da ressonância:

$$\delta\lambda_{3\mathrm{dB}} = \frac{(1 - ra)\lambda_0^2}{\pi n_g L \sqrt{ra}}$$

- Diminui drasticamente quando $r, a \to 1$ (alta refletividade e baixas perdas).

Fator de Qualidade (Q) e Finesse ($\mathcal{F}$)

Definição Física do Fator de Qualidade Q

$$Q = \omega_0 \frac{\text{Energia Armazenada}}{\text{Potência Dissipada}} = \frac{\lambda_0}{\delta\lambda_{3\text{dB}}} = \frac{\pi n_g L\sqrt{ra}}{\lambda_0(1-ra)}$$

Decomposição das Perdas:

$$\frac{1}{Q_{\text{loaded}}} = \frac{1}{Q_{\text{int}}} + \frac{1}{Q_{\text{ext}}}$$

- Q_{int}: determinado por perdas lineares de guia (a).
- Q_{ext}: acoplamento aos guias de acesso (κ).

Finesse ($\mathcal{F}$):

$$\mathcal{F} = \frac{\text{FSR}}{\delta\lambda_{3\text{dB}}} = \frac{\pi\sqrt{ra}}{1-ra}$$

- Número de canais resolúveis em um FSR.
- Independe de L em primeira ordem.

Equacionamento e Respostas Through e Drop

Topologia com Dois Acopladores (r_1, κ_1 e r_2, κ_2)

Inserindo um segundo guia no lado oposto do anel, a potência ressonante é transferida para a porta Drop.

Porta Through ($T_{\mathbf{th}}$):

$$T_{\text{th}} = \frac{r_1^2 - 2r_1 r_2 a \cos\phi + (r_2 a)^2}{1 - 2r_1 r_2 a \cos\phi + (r_1 r_2 a)^2}$$

- Apresenta perfil de rejeição notch.
- Nulo perfeito quando $r_1 = r_2 a$.

Porta Drop ($T_{\mathbf{drop}}$):

$$T_{\text{drop}} = \frac{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)\, a}{1 - 2r_1 r_2 a \cos\phi + (r_1 r_2 a)^2}$$

- Perfil passa-faixa lorentziano em λ_0.
- Transmissão de 100% se simétrico e sem perdas.

Sensibilidade Térmica e Desvio Espectral

O Efeito Termo-Óptico no Silício

O silício possui um alto coeficiente termo-óptico positivo ($\frac{dn_{\mathrm{Si}}}{dT} \approx 1{,}86 \times 10^{-4}\,\mathrm{K}^{-1}$), gerando deslocamento espectral das ressonâncias com a temperatura ambiente:

$$\frac{d\lambda_0}{dT} = \frac{\lambda_0}{n_g}\frac{dn_{\mathrm{eff}}}{dT} \approx 70 \text{ a } 85\,\mathrm{pm/K} \quad (\text{em } \lambda_0 = 1550\,\mathrm{nm})$$

Impacto em DWDM:

- Uma variação de $\Delta T = 10\,^{\circ}\mathrm{C}$ desvia a ressonância em $\sim 0{,}8\,\mathrm{nm}$ (100 GHz), desalinhando o canal ITU.

Estratégias de Compensação:

- **Ativa:** Microaquecedores integrados de TiN com malha de controle PID.
- **Atermal:** Cladding de polímero com $dn/dT < 0$.

Fator de Acúmulo de Intensidade na Cavidade (B)

Em ressonância, a intensidade intracavidade é amplificada por um fator $B \gg 1$:

$$B = \left| \frac{E_{\text{ring}}}{E_{\text{in}}} \right|^2 = \frac{1 - r^2}{(1 - ra)^2} \approx \frac{2}{\pi}\mathcal{F}$$

Para um anel com $Q \sim 10^5$, o campo óptico interno pode ser centenas de vezes superior ao do guia de acesso.

Consequências Físicas:

- **Efeito Kerr Óptico ($\chi^{(3)}$):** Auto-modulação de fase e geração de quatro ondas (FWM) com baixos limiares.
- **Absorção de Dois Fótons (TPA) e FCA:** Em SOI, pulsos intensos geram portadores livres que causam atenuação não linear e biestabilidade.

Aplicações I: Multiplexação DWDM e Moduladores

Multiplexação DWDM em Silício

- Bancos de MRRs em cascata com raios escalonados $(R_1, R_2, \ldots, R_N)$.
- Demultiplexação de canais múltiplos com pegada total inferior a $0{,}05\,\mathrm{mm}^2$.
- Baixa diafonia (*crosstalk*) entre canais adjacentes.

Moduladores Eletro-ópticos

- Junção p-n integrada ao anel operando sob depleção de portadores.
- Chaveamento ultrarrápido (> 50 Gb/s).
- Consumo energético recorde (< 10 fJ/bit) devido à modulação ressonante.

Aplicações II: Biosensores e Pentes de Frequência

Sensores Refratométricos Sem Marcação

- Interação do campo evanescente com moléculas adsorvidas na superfície do silício.
- Sensibilidade refratométrica $S_h > 100$ nm/RIU.
- Limite de detecção na escala de 10^{-6} RIU.

Pentes de Frequência Kerr (SiN)

- Em cavidades de Nitreto de Silício ($Q > 10^6$), FWM paramétrico gera pentes ópticos coerentes (microcombs).
- Aplicações em relógios ópticos atômicos, espectroscopia de precisão e transceptores terabit.

Síntese do Módulo e Transição

Conceitos-Chave Fixados [MOD-PH06]

- A recirculação óptica em anel viabiliza ressonâncias ultraestreitas em áreas microscópicas.
- O acoplamento crítico ($r = a$) garante extinção teórica infinita no filtro notch Through.
- O compromisso fundamental reside entre alta seletividade espectral ($Q \gg 1$) e suscetibilidade à deriva térmica e dispersão.

Relação com o Próximo Módulo [MOD-PH07]

No próximo módulo, exploraremos as **Grades de Bragg, Guias Periódicos e Estruturas Subcomprimento de Onda (SWG)**, abordando a física de acoplamento contra-direcional distribuído e engenharia de meio efetivo.