UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DEE)

[MOD-DIO] Diodos de Altas Frequências e Circuitos de Controle

Física Semicondutora, Chaves PIN, Misturadores Schottky e Multiplicadores Reativos

Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

LabTel — Laboratório de Telecomunicações | IN-FOTON





Sumário do Módulo [MOD-DIO]

Parte I: Física e Limitações em RF

- Falha da junção p-n e tempo de vida τ;
- Diodo Schottky: condução unipolar e f_c em THz;
- Comparativo de estruturas semicondutoras.

Parte II: Diodos PIN e Controle

- Modulação por corrente DC ($r_s \propto 1/I_{\mathrm{DC}}$);
- Chaves SPST série e derivação (shunt);
- Chaves SPDT com linhas $\lambda/4$ e Bias Tee.

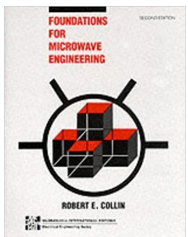
Parte III: Misturadores Schottky

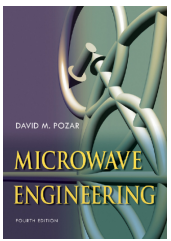
- Teoria da conversão heteródina;
- Misturadores monobalanceados (Rat-Race 180°);
- Misturadores duplamente balanceados em anel.

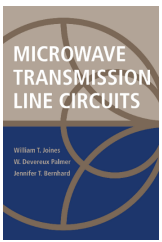
Parte IV: Multiplicação e Dispositivos NDR

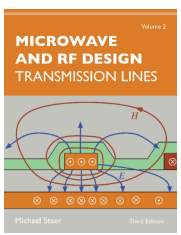
- Diodo Varactor e relações de Manley-Rowe;
- Síntese de dobrador reativo ($f_0 \rightarrow 2f_0$);
- Diodo SRD (snap-off), Gunn e IMPATT.

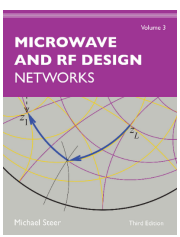
Bibliografia Canônica e Literatura de Referência











Livros-texto canônicos de micro-ondas.

Fontes Canônicas Recomendadas:

- **David M. Pozar (2012):** *Microwave Engineering*, 4ª Ed., Cap. 10 (*Active RF and Microwave Devices: Diodes, Mixers, Switches*);
- **Michael Steer (2019):** *Microwave and RF Design: Modules*, Vol. 4, Cap. 6 (*Mixer and Source Modules*);
- **Stephen A. Maas (2003):** *Nonlinear Microwave and RF Circuits*, 2ª Ed., Artech House;
- **Robert E. Collin (2001):** *Foundations for Microwave Engineering*, Cap. 11;
- **Joseph F. White (1982):** *Microwave Semiconductor Engineering*.

Limitações da Junção P-N Convencional em Micro-ondas

A junção p-n clássica falha em frequências de GHz devido a dois fenômenos fundamentais associados a portadores minoritários:

1. Armazenamento de Minoritários:

- Injeção de minoritários sob condução direta:

  $$Q_d = I_{\mathrm{DC}} \cdot \tau \quad (\tau \approx 10^{-8} - 10^{-6}\ \mathrm{s})$$

- Na inversão da tensão, a corrente reversa persiste até drenar Q_d;
- Em $f > 1$ GHz, o período $T < 1$ ns $\ll \tau$: o diodo não corta e dissipa energia continuamente.

2. Capacitância de Difusão (C_d):

- Derivada da carga armazenada:

  $$C_d = \frac{dQ_d}{dV} = \tau \frac{qI_{\mathrm{DC}}}{\eta kT}$$

- Em $I_{\mathrm{DC}} = 10$ mA, C_d atinge > 100 pF;
- Em 10 GHz, a reatância $X_{Cd} \approx 0{,}16\,\Omega$, curtocircuitando totalmente o sinal de RF.

Diodo de Barreira Schottky: Condução Unipolar

O diodo Schottky substitui a junção semicondutora por uma interface **metal-semicondutor** (Au, Pt, TiW sobre n-GaAs ou n-Si):

Transporte por Emissão Termoiônica:

- Condução unipolar por **elétrons majoritários**:

$$I(V) = I_s \left(e^{\frac{qV}{\eta kT}} - 1 \right)$$

$$I_s = AA^* T^2 e^{-\frac{q\phi_B}{kT}}$$

- **Sem acúmulo de carga:** $\tau \approx 0 \implies C_d \approx 0$;
- Tempo de transição em picossegundos (< 1 ps), operando até frequências de terahertz (> 1 THz).

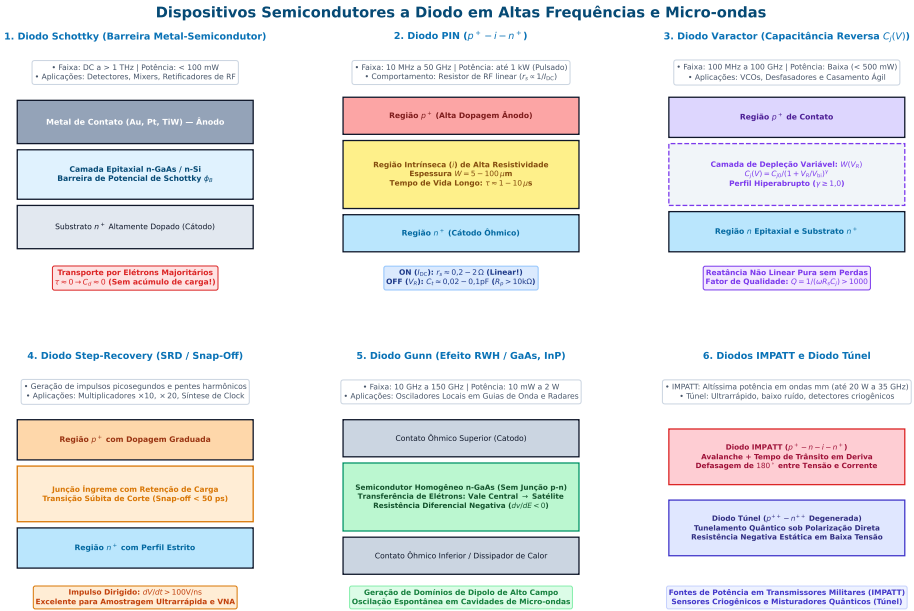
Parâmetros Intrínsecos

- R_s: Resistência série $(2 - 8\,\Omega)$;
- C_{j0}: Capacitância $(0{,}02 - 0{,}1$ pF);
- Frequência de corte intrínseca:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_s C_{j0}} > 1 \text{ THz}$$

Aplicações: Detectores de envoltória, retificadores de RF e misturadores.

Panorama Estrutural dos Diodos de Micro-ondas



Estruturas semicondutoras, mecanismos físicos condutores e faixas de operação.

Física e Funcionamento do Diodo PIN ($p^+ - i - n^+$)

O diodo PIN insere uma camada intrínseca de alta resistividade (i) e espessura W entre as regiões p^+ e n^+:

Tempo de Vida Longo na Camada i:

- Portadores na camada i têm recombinação lenta ($\tau \approx 1 - 10\,\mu$s);
- Frequência de transição:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \approx 15 - 150 \text{ kHz}$$

- Em $f < f_0$: opera como retificador comum;
- Em $f \gg f_0$: a carga $Q = I_{\text{DC}}\tau$ não oscila no período de RF, eliminando distorções.

Comportamento Dual em RF:

Estado Direto ($I_{\text{DC}} > 0$)

Resistor linear puramente ôhmico:

$$r_s \approx \frac{W^2}{2\mu_a \tau I_{\text{DC}}} \quad (0{,}1 - 5\,\Omega)$$

Estado Reverso ($V_R < 0$)

Camada i totalmente depletada:

$$C_t = \frac{\varepsilon A}{W} \quad (0{,}02 - 0{,}1 \text{ pF})$$

em paralelo com $R_p > 10$ kΩ.

Chaves SPST Série e Shunt com Diodos PIN

Análise analítica das equações de espalhamento para linhas de $Z_0 = 50\,\Omega$:

Chave SPST Série:

- **Perda de Inserção (ON, I_{DC}):**

$$IL \approx 20\log_{10}\left|1 + \frac{r_s}{2Z_0}\right|$$

(Típico: $0{,}1 - 0{,}3$ dB);

- **Isolação (OFF, V_R):**

$$ISO \approx 20\log_{10}\left(\frac{1}{2\omega C_t Z_0}\right)$$

- **Limitação:** A isolação cai 6 dB por oitava com a frequência (C_t).

Chave SPST Derivação (Shunt):

- **Perda de Inserção (ON, V_R):**

$$IL \approx 10\log_{10}\left[1 + \left(\frac{\omega C_t Z_0}{2}\right)^2\right]$$

(Típico: $< 0{,}1$ dB);

- **Isolação (OFF, I_{DC}):**

$$ISO \approx 20\log_{10}\left|1 + \frac{Z_0}{2r_s}\right|$$

(Típico: $25 - 35$ dB);

- **Vantagem:** Ótima dissipação térmica.

Chaves SPDT com Linhas de Quarto de Onda ($\lambda/4$)

Comutação entre canais (Porta 1 $\rightarrow$ Porta 2 ou 3) com transformadores de impedância:

Princípio de Inversão de Impedância:

- O braço isolado recebe polarização direta (D_2 ON, $r_s \approx 0$);
- A linha $\lambda/4$ inverte o curto-circuito para **circuito aberto virtual**:

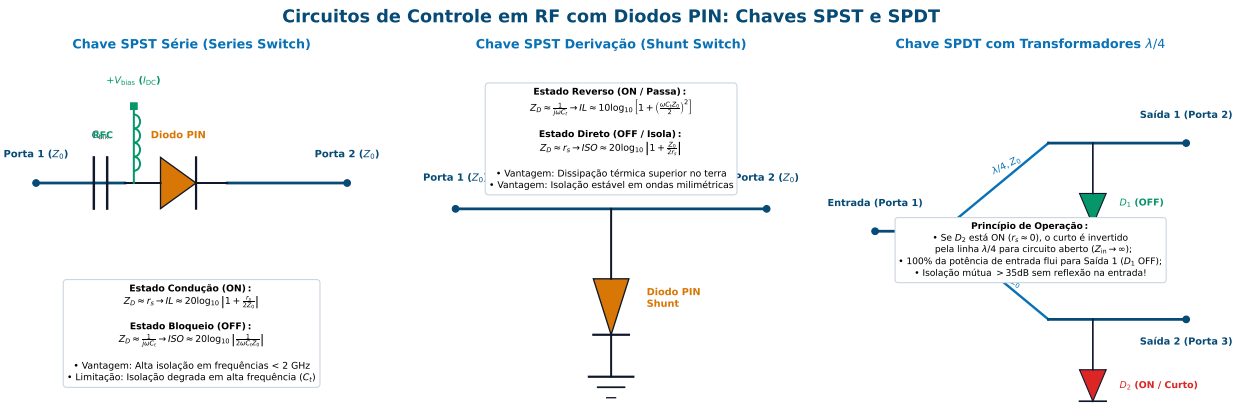
$$Z_{\text{in}} = \frac{Z_0^2}{Z_{D2}} = \frac{Z_0^2}{r_s} \rightarrow \infty$$

- O nó central não sofre reflexão para a porta ativa;
- O braço transmissor opera com diodo D_1 OFF (C_t), transmitindo o sinal com $IL < 0{,}5$ dB;
- Isolação cruzada superior a 35 dB.

Rede de Polarização (Bias Tee):

- **Indutor RFC (Choke):** Alta reatância em RF ($\omega L_{\text{RFC}} \gg Z_0$), impedindo fuga para a fonte DC;
- **Capacitor C_{block}:** Baixa reatância em RF ($1/(\omega C) \ll Z_0$), bloqueando corrente contínua entre as portas de sinal.

Topologias de Chaves e Circuitos de Controle com Diodo PIN



Chaves SPST série, SPST em derivação com via para o terra e chave SPDT com linhas $\lambda/4$.

Conversão de Frequência Não Linear (Mixers)

O misturador translada o sinal espectral através do produto de correntes governado pela não-linearidade do diodo Schottky:

Modulação de Condutância por LO:

- Sinal de LO modula a condutância:

$$g(t) = g_0 + 2\sum_{n=1}^{\infty} g_n \cos(n\omega_{\mathrm{LO}} t)$$

- Multiplicação por $v_{\mathrm{RF}}(t) = V_{\mathrm{RF}} \cos(\omega_{\mathrm{RF}} t)$:

$$i(t) = g(t) \cdot v_{\mathrm{RF}}(t)$$

- Batimento para $n = 1$:

$$i_{\mathrm{mix}}(t) = g_1 V_{\mathrm{RF}} \cos((\omega_{\mathrm{RF}} \pm \omega_{\mathrm{LO}})t)$$

- FI seleciona $f_{\mathrm{IF}} = |f_{\mathrm{RF}} - f_{\mathrm{LO}}|$.

Figuras de Mérito Fundamentais:

Parâmetros de Projeto

- **Perda de Conversão (CL):**

$$CL = 10 \log_{10}(P_{\mathrm{RF}}/P_{\mathrm{IF}})$$

(Típico: $5 - 8$ dB);

- **Isolação LO-RF e LO-IF:** > 30 dB;
- **Linearidade (IIP_3, $P_{1\mathbf{dB}}$):** Alta imunidade a intermodulações espúrias.

Misturadores Balanceados: Monobalanceado e em Anel

A evolução de diodo único para topologias balanceadas proporciona cancelamento de ruído e alta isolação mútua:

Monobalanceado (Híbrido 180°):

- Utiliza anel híbrido Rat-Race (1,5λ) conectando 2 diodos Schottky;
- O ruído de amplitude (AM) do oscilador local atinge os diodos em fase e é **subtraído no canal de FI**;
- Isolação natural LO-RF superior a 30 dB proporcionada pelo híbrido.

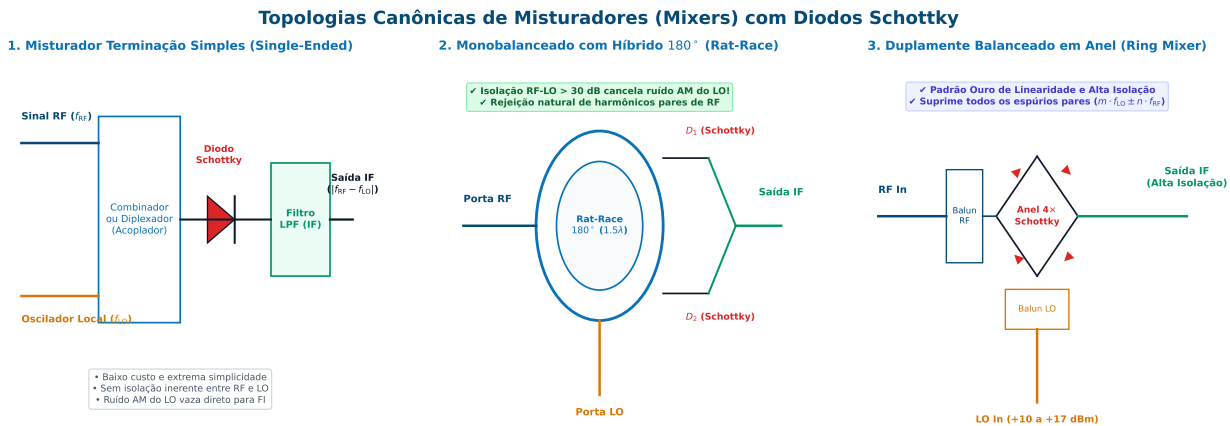
Duplamente Balanceado (Anel 4×):

- Quatro diodos em anel chaveados por dois baluns balanceados;
- **Isolação completa** entre todas as três portas (RF, LO, IF > 35 dB);
- Rejeição estrita de todos os produtos espúrios com harmônicos pares:

$$m \cdot f_{\mathrm{LO}} \pm n \cdot f_{\mathrm{RF}} \quad (m, n \text{ pares})$$

- Padrão ouro em conversores 5G/6G.

Topologias de Misturadores Schottky em Micro-ondas



Comparativo entre misturador de terminação simples, monobalanceado Rat-Race e em anel duplamente balanceado.

Diodo Varactor e as Relações de Manley-Rowe

O varactor opera sob polarização reversa, explorando a capacitância não linear de depleção $C_j(V_R)$:

Capacitância Não Linear:

- Variação contínua com a tensão reversa V_R:

$$C_j(V_R) = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_{bi}}\right)^{\gamma}}$$

  ($\gamma = 0{,}5$ abrupta, $\gamma \geq 1{,}0$ hiperabrupta);
- Fator de mérito: $Q = \frac{1}{\omega R_s C_j} > 1000$;
- Aplicações clássicas: sintonia contínua de VCOs e desfasadores analógicos.

Teorema de Manley-Rowe (1956):

- Reatância não linear sem perdas satisfaz:

$$\sum_{m,n} \frac{mP_{m,n}}{mf_1 + nf_2} = 0$$

- Para um dobrador ($f_1 = f_0, m = 1, 2$):

$$\frac{P_{1,0}}{f_0} + \frac{P_{2,0}}{2f_0} = 0$$

$$\implies P_{2,0} = -P_{1,0}$$

- **Eficiência teórica de conversão de 100%!**

Projeto de Dobrador de Frequência com Varactor ($f_0 \rightarrow 2f_0$)

Estrutura de filtragem e casamento conjugado não linear:

Filtros e Casamento Conjugado:

- **Entrada (f_0):** Filtro passa-baixas (LPF) com frequência de corte $\approx 1{,}5f_0$. Permite passagem de f_0 e bloqueia retorno da harmônica $2f_0$;
- **Elemento Não Linear:** Varactor polarizado via Bias Tee no ponto de máxima inclinação dC/dV;
- **Saída ($2f_0$):** Filtro passa-faixas (BPF) centrado em $2f_0$. Reflete a fundamental residual e entrega a harmônica casada para a carga.

Desempenho Prático:

- Devido à resistência série parasitária R_s e perdas de inserção dos filtros planares, o rendimento atinge:

$$\eta_{\text{prático}} \approx 55\% - 75\%$$

- Muito superior a multiplicadores resistivos baseados no teorema de Page ($\eta \leq 1/n^2 = 25\%$);
- Geração limpa de ondas milimétricas a partir de sintetizadores estáveis em banda C/X.

Arquitetura e Espectro do Dobrador de Frequência

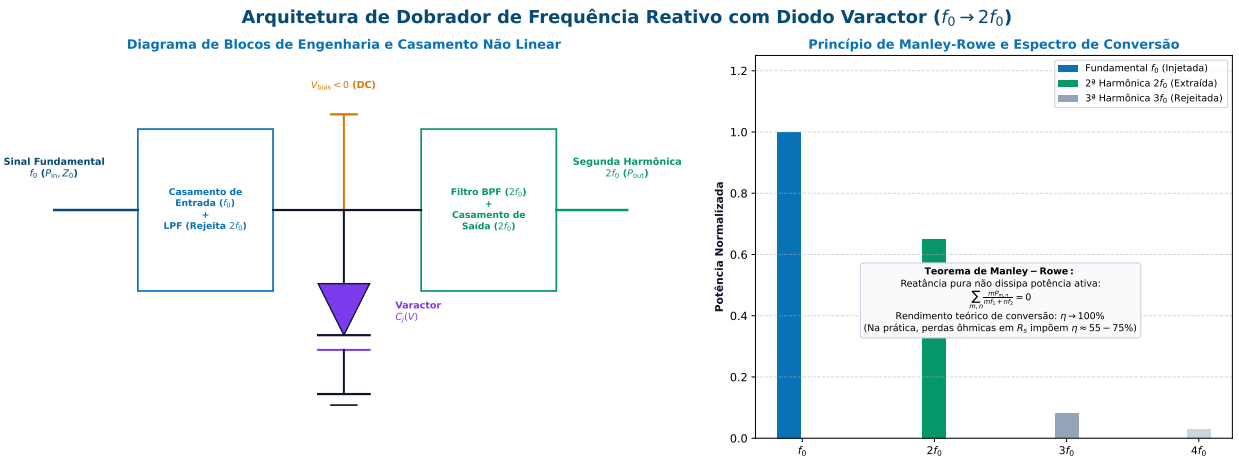


Diagrama de blocos com filtros casadores de entrada/saída e espectro de conversão reativo.

Diodos Especializados: SRD, Gunn, IMPATT e Túnel

Dispositivos dedicados para geração de impulsos, ondas milimétricas e osciladores:

Diodo Step-Recovery (SRD):

- Perfil íngreme que cessa a condução reversa repentinamente (*snap-off* < 50 ps);
- Geração de pulsos ultracurtos e multiplicadores harmônicos de alta ordem ($\times 10, \times 20$).

Diodo Gunn (Efeito RWH):

- Semicondutor n-GaAs/InP homogêneo;
- Transferência de elétrons para vales satélites com menor mobilidade ($dv/dE < 0$);
- Osciladores autônomos em guias de ondas de 10 a 150 GHz.

Diodo IMPATT (Avalanche):

- Ionização por impacto em avalanche combinada com tempo de trânsito em deriva;
- **Maior potência de estado sólido em mm-Waves:** dezenas de watts em 35 GHz e watts contínuos em 100 GHz.

Diodo Túnel (Esaki):

- Junção degenerada com tunelamento mecânico-quântico de elétrons;
- Resistência diferencial negativa em baixíssima tensão, com ruído térmico mínimo.

Quadro Comparativo Global dos Diodos de Micro-ondas

Diodo	Portadores	Frequência	Potência	Principais Aplicações
Schottky	Majoritários (e^-)	DC– $>$ 1 THz	$<$ 100 mW	Detectores de envoltória, Mixers balanceados, Retificadores.
PIN	Plasma ambipolar	10 MHz – 50 GHz	até 1 kW (pulso)	Chaves TDD, Atenuadores lineares, Desfasadores digitais.
Varactor	Eletrostático C_j	100 MHz – 100 GHz	$<$ 500 mW	VCOs sintonizáveis, Multiplicadores reativos de Manley-Rowe.
SRD	Carga retida	500 MHz – 40 GHz	0,5 – 5 W	Geração de impulsos em picossegundos, Pentes harmônicos.
Gunn	Vales $\Gamma \rightarrow L$	10 GHz – 150 GHz	10 mW – 2 W	Osciladores locais para guias de ondas, Radares automotivos.
IMPATT	Avalanche + Deriva	5 GHz – 300 GHz	até 50 W pico	Transmissores de potência mm-Waves, Radares aeroespaciais.
Túnel	Tunelamento quântico	DC– $>$ 100 GHz	$<$ 10 mW	Amplificadores de baixíssimo ruído, Sensores criogênicos.

Transição de Módulo: Compreendido o controle de amplitude, fase e conversão de frequência a 2 terminais, o próximo módulo introduz os **transistores de 3 terminais (GaN/GaAs)** e a síntese de amplificadores lineares com ganho ativo ([**MOD-AMP**]).