

Diodo:

- Introdução aos semicondutores.
- Funcionamento do diodo de junção.
- Outros diodos: zener, célula solar, fotodiodo, Led.
- Modelos do diodo e do zener
- Introdução à análise de circuitos com diodos.
- Aplicações dos diodos:
 - Rectificadores.
 - Limitadores.
 - Circuitos lógicos.

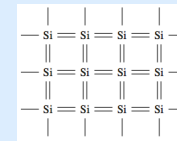
Semicondutor intrínseco

Cristal de Silício - estrutura tetraédrica - 4 electrões de valência.

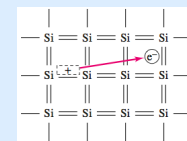


Monocrystalline silicon ingot grown by the Czochralski process

T = 0K

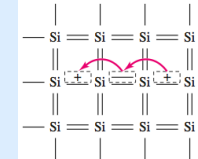


T > 0K (energia térmica)



Electrão-livre (portador)

**“Espaço-vazio” =
= lacuna ou buraco =
carga positiva (portador)**



Sempre que um electrão salta de uma ligação covalente para uma lacuna, deixa uma carga positiva: é como se a lacuna se deslocasse.

Mas também existe o processo de recombinação electrão-lacuna.

Concentração de portadores intrínsecos - n_i (#/m³) = electrões livres / m³ = lacunas / m³

Semicondutores

Condutores - enorme quantidade de electrões livres a T=300K.

Isolantes - “ausência” de electrões livres a T=300K.

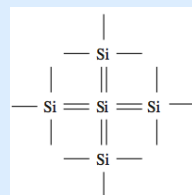
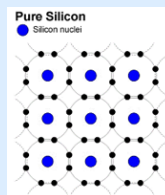
Semicondutores - “ausência” de electrões livres a T=0K, mas a T=300K possui alguns.

Semicondutores mais comuns: silício e arsenieto de gálio.

**Átomo e
electrões de valência**

III	IV	V
5 B Boron	6 C Carbon	
13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus
31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic
49 In Indium		51 Sb Antimony

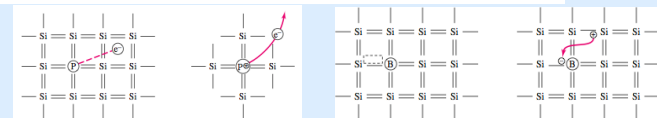
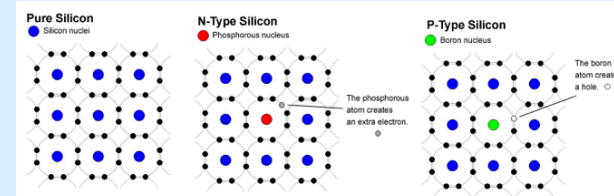
**Semicondutor intrínseco
Ligações covalentes T=0K**

**Semicondutor extrínseco / dopado**

Para ser útil, um semicondutor deve possuir uma concentração de portadores bem maior que n_i .

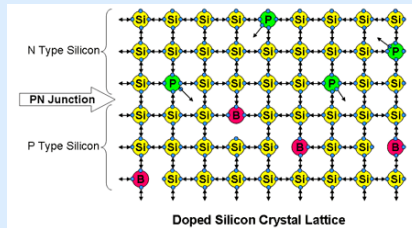
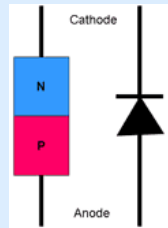
Dopagem (adição de “impurezas”):

- adição de átomos de elementos (dutores) do grupo V --> tipo N
- adição de átomos de elementos (aceitadores) do grupo III --> tipo P

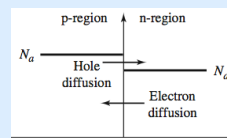


Junção pn

Junção metalúrgica entre semicondutor do tipo p e semicondutor do tipo n.

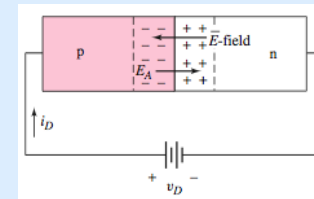


Difusão inicial



Junção pn (3)

Polarização directa ($v_D \geq 0.6V$) - a zona de depleção desaparece



$$i_D = I_S \left[e^{\left(\frac{v_D}{n V_T} \right)} - 1 \right]$$

Corrente de saturação inversa - I_S
Coeficiente de emissão - $1 \leq n \leq 2$
 $V_T = 26mV @ T=300K$
 $e = 2.718....$

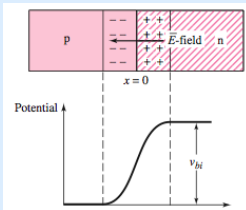
Para Si, tipicamente, $10^{-18} \leq I_S \leq 10^{-12} A$

- Tensão de entrada em condução (*cut-in*) - $V_\gamma \approx 0.6V$
- Para diodos de potência v_D pode ser $> 1V$.

Dispositivo não linear que só conduz num dos sentidos - efeito rectificador.
Acabamos de inventar o DIODO de junção pn !!!

Junção pn (2)

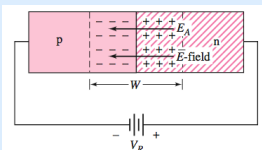
Em equilíbrio



- Região de depleção
- Barreira de potencial

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = V_T \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \approx 0.6V$$

k - constante de Boltzmann
 e - carga do electrão
 T - temperatura absoluta
 N_a/N_d - concentração aceitadores/dadores
 n_i - concentração intrínseca
Tensão térmica - $V_T = 26mV @ T=300K$

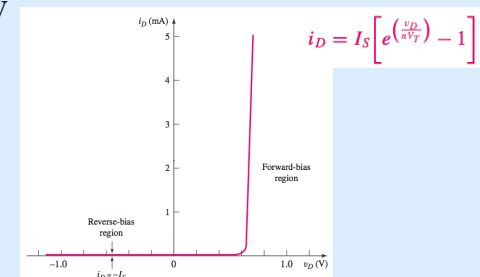
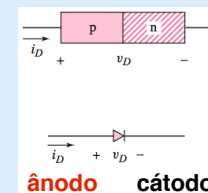


Contra-polarizada

- Região de depleção aumenta

Diodo

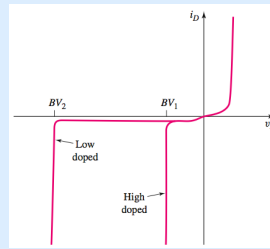
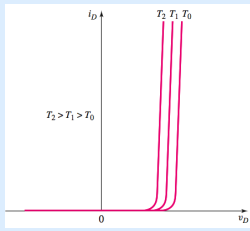
Característica I-V



I_S e V_T dependem da temperatura: $\Delta V_\gamma / \Delta T \approx -2mV / ^\circ C$

Diodo (2) e Zener

V_f depende da temperatura:



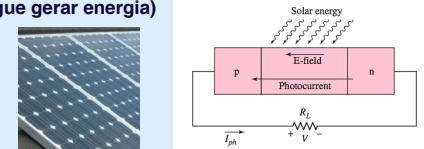
Avalanche Breakdown: tensões inversas suficientemente elevadas (50 a 1500V) provocam o alargamento da zona de depleção e podem “romper” ligações covalentes, induzindo a criação de portadores livres (pares electrão-lacuna). Ficam criadas condições para a circulação de correntes inversas elevadas.

Zener Breakdown: dopagens elevadas permitem que o fenómeno de avalanche ocorra para tensões bem mais baixas (por exemplo, 2.4V).

Célula Solar e FotoDiodo

Célula Solar (consegue gerar energia)

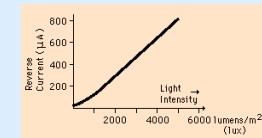
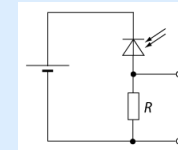
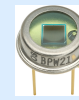
- Si, GaAs, outros



FotoDiodo (a luz incidente na zona de depleção aumenta significativamente I_S)

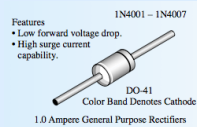
- I_S é proporcional à luz incidente

- usa-se sempre na zona inversa



Diodo (3)

Algumas especificações da família 1N40xx

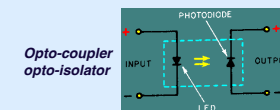
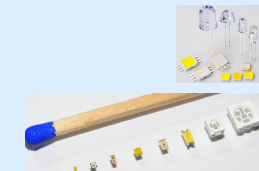
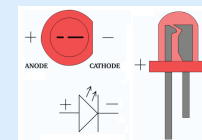


Absolute Maximum Ratings* T = 25°C unless otherwise noted			
Symbol	Parameter	Value	Units
I_o	Average Rectified Current 375° lead length @ $T_A = 75^\circ\text{C}$	1.0	A
$i_s(\text{surge})$	Peak Forward Surge Current 8.3 ms single half-sine-wave Superimposed on rated load (JEDEC method)	30	A
P_D	Total Device Dissipation	2.5	W

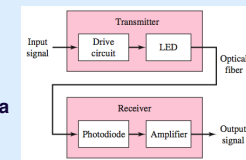
Electrical Characteristics T = 25°C unless otherwise noted						
Parameter	4001	4002	4003	4004	4005	4006
Peak Repetitive Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800
Maximum RMS Voltage	35	70	140	280	420	560
DC Reverse Voltage (Rated V_R)	50	100	200	400	600	800
Maximum Reverse Current @ rated V_R $T_A = 25^\circ$ $T_A = 100^\circ$				5.0 500		
Maximum Forward Voltage @ 1.0 A				1.1		
Maximum Full Load Reverse Current, Full Cycle $T_A = 75^\circ$				30		
Typical Junction Capacitance $V_R = 4.0\text{ V}$, $f = 1.0\text{ MHz}$				15		

LED - light emitting diode

- Polarizado directamente emite luz (desde infra-vermelho a ultra-violeta)
- Tensão de condução varia com a cor (ex: $\approx 2\text{V}$ para Red; $\approx 3\text{V}$ para Green/White)
- enorme variedade de formas, quer em through hole, quer em smd
- potências de mW até Watts
- ângulos de abertura de 5° a 140°
- semiconductor mais comum: GaAs

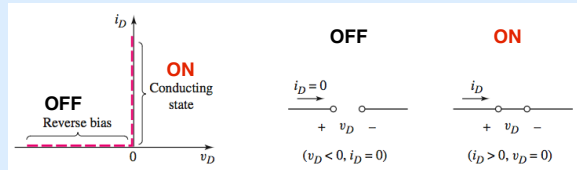


Transmissão por fibra óptica

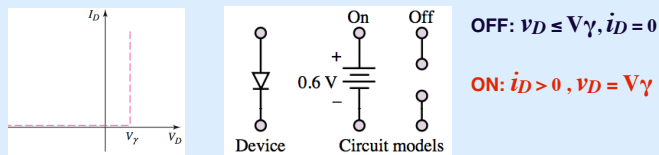


Diodo: modelos

1) Modelo diodo ideal



2) Modelo com offset V_γ

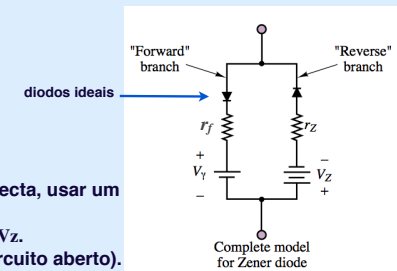
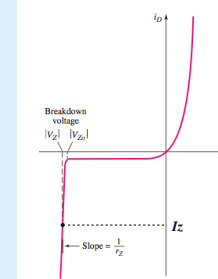


Zener: modelos

O diodo zener usa-se, em geral, na zona inversa.

A tensão de zener é especificada @ I_Z

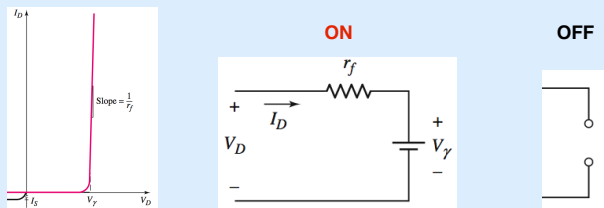
Ex: 5.1V @ 5mA.



- Para modelar um zener na zona directa, usar um dos modelos do diodo.
- Na zona inversa, substituir V_γ por V_Z .
- Entre V_γ e V_Z , a corrente é nula (circuito aberto).

Diodo: modelos (2)

3) Modelo com aproximação linear na condução (on)



Que modelo usar ?

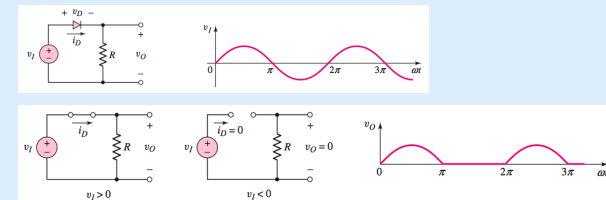
Depende ... do erro que se aceita e dos outros valores no circuito

Por exemplo:

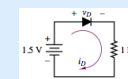
- 1) Se as tensões no circuito são de 60V, desprezar 0.6V corresponde a um erro de 1%, o que é, em geral, aceitável.
- 2) Se falarmos de 6V, desprezar 0.6V dará um erro de 10%, o que pode não ser aceitável.

Introdução à análise de circuitos com diodos

Exemplo 1 com modelo de diodo ideal (rectificador de meia onda)

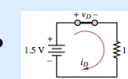


Exemplo 2 com modelo de diodo ideal



ON?

ON: $i_D > 0$, $v_D \geq 0$??
 $v_D = 0$ e $i_D = 1.5\text{mA}$!!



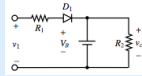
OFF?

OFF: $v_D < 0$, $i_D = 0$??
 $i_D = 0$ mas $v_D = 1.5\text{V}$

Introdução à análise de circuitos com diodos (2)

Exemplo 3, modelo c/ offset

$V_B = 2\text{ V}$; $R_1 = 1\text{ k}\Omega$; $R_2 = 500\text{ }\Omega$; $V_\gamma = 0.6\text{ V}$.



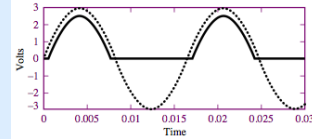
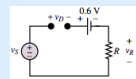
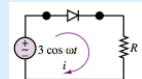
ON: $i_{D1} \geq 0$; $v_I \geq ??$

$$-v_I + R_1 i_{D1} + v_{D1} + 0.6 + 2 = 0$$

$$i_{D1} = (v_I - 2.6)/R_1 \rightarrow v_I \geq 2.6\text{ V}$$

Para que tensões v_I a bateria V_B carrega ?? Resposta: $v_I > 6.6\text{ V}$

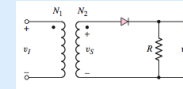
Exemplo 4, modelo c/ offset



$v_S = 3\text{ Vp}$; $v_R = 2.4\text{ Vp}$

Diodo - aplicações

Rectificador de meia onda



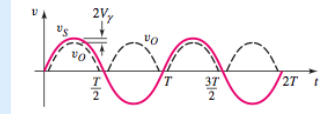
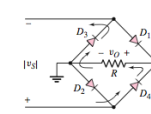
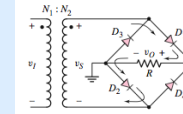
$$\text{ON: } i_D = (v_S - V_\gamma)/R$$

$$v_D = v_S - v_O$$

Máx. tensão inversa (PIV) $\approx v_S$ pico



Rectificador de onda completa em ponte



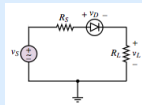
Corrente média = metade de I_R

Máx. tensão inversa (PIV) $\approx v_S$ pico

Introdução à análise de circuitos com diodos (3)

Exemplo 5, modelo c/ aproximação linear na condução

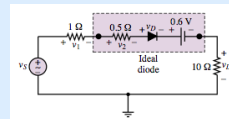
$v_S = V_p \cos \omega t$; $V_\gamma = 0.6\text{ V}$; $R_S = 1\text{ }\Omega$; $R_L = 10\text{ }\Omega$



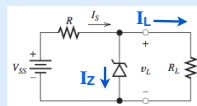
Máxima $i_D = 1\text{ A}$

Pergunta: máximo v_S ??

Resposta: $v_S \leq 12.1\text{ Vpico}$



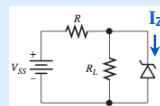
Exemplo 6, Zener



$V_{SS} = 24\text{ V}$; $R = 1.2\text{ k}\Omega$; $R_L = 6\text{ k}\Omega$

Zener = 15V

Pergunta: $I_Z = ??$ $I_L = ??$

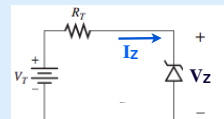


$V_T = V_{SS} \cdot 6\text{ k}/(6\text{ k} + 1.2\text{ k}) = 20\text{ V}$; $R_T = 1\text{ k}\Omega$

Zener conduz ? Sim

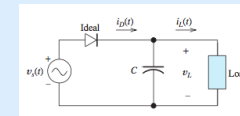
$I_L = V_Z/R_L = 15/6\text{ k} = 2.5\text{ mA}$

$I_Z = (V_T - V_Z)/R_T = 5/1\text{ k} = 5\text{ mA}$



Diodo - aplicações (2)

Rectificador de meia onda com filtro



$t_{\text{ON}} + t_{\text{OFF}} = T$

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt}$$

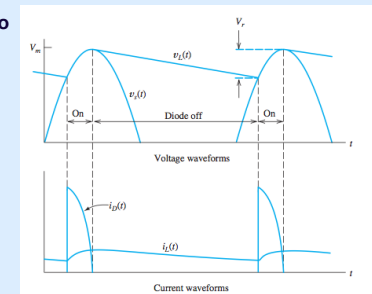
Aproximação1: descarga linear

Aproximação2: $t_{\text{OFF}} \gg t_{\text{ON}}$

Tensão de ripple:

$$V_r = dv_c = i_c dt/C$$

$$V_r = I_{L\text{med}} T/C$$



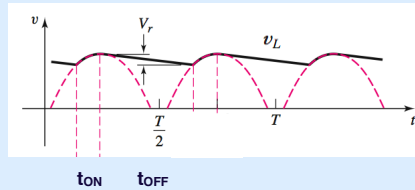
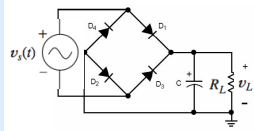
$$V_{L\text{med}} \approx V_m - V_\gamma - (V_r/2)$$

$$I_{L\text{med}} \approx V_{L\text{med}}/R_L$$

PIV $\approx 2 V_m$ Porquê ??

Diodo - aplicações (3)

- Rectificador de onda completa com filtro



$$t_{ON} + t_{OFF} = T/2 \quad i_c = C \frac{dv_c}{dt}$$

Aproximação1: descarga linear

Aproximação2: $t_{OFF} \gg t_{ON}$

Tensão de ripple:

$$V_r = dv_c = i_c dt / C$$

$$V_r = I_{Lmed} T/2C$$

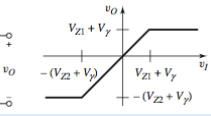
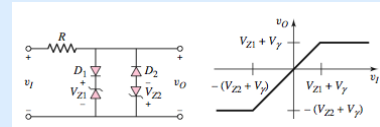
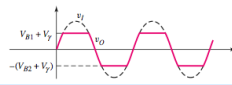
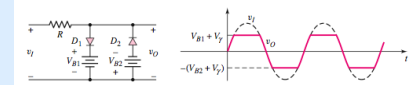
$$V_{Lmed} \approx V_m - 2 V_\gamma - (V_r/2)$$

$$I_{Lmed} \approx V_{Lmed} / R_L$$

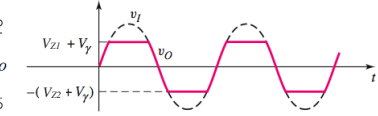
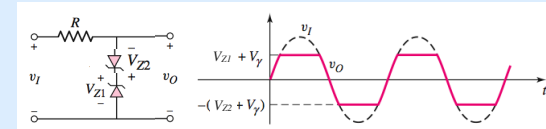
PIV $\approx V_m$: diodos em série 2 a 2

Diodo - aplicações (5)

- Limitadores de tensão (*clipper*) com zeners



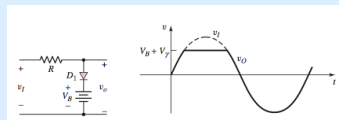
Se $V_{Z1} \neq V_{Z2}$: $I_{Z1} \neq I_{Z2}$



Calcular a potência de pico dissipada por Z1=2V4 e Z2=4V7, quando v_i é sinusoidal com 16Vpp e $R=500\Omega$.
R: P1=24mWp P2=25mWp

Diodo - aplicações (4)

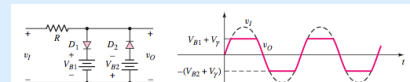
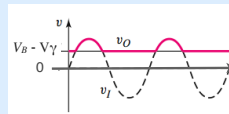
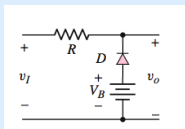
- Limitadores de tensão (*clipper*)



$$i_{D1} = 0 : v_o = v_i$$

$$i_{D1} \geq 0 :$$

$$v_i \geq V_B + V_\gamma \quad v_o = V_B + V_\gamma$$

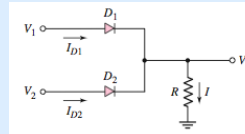


$$i_{D1} \geq 0 : v_o = V_{B1} + V_\gamma$$

$$i_{D2} \geq 0 : v_o = -(V_{B2} + V_\gamma)$$

Diodo - aplicações (6)

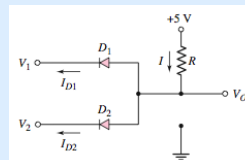
- Portas Lógicas



OR

V ₁ (V)	V ₂ (V)	V _o (V)
0	0	0
5	0	4.3
0	5	4.3
5	5	4.3

Nota: $V_\gamma = 0.7V$



AND

V ₁ (V)	V ₂ (V)	V _o (V)
0	0	0.7
5	0	0.7
0	5	0.7
5	5	5