

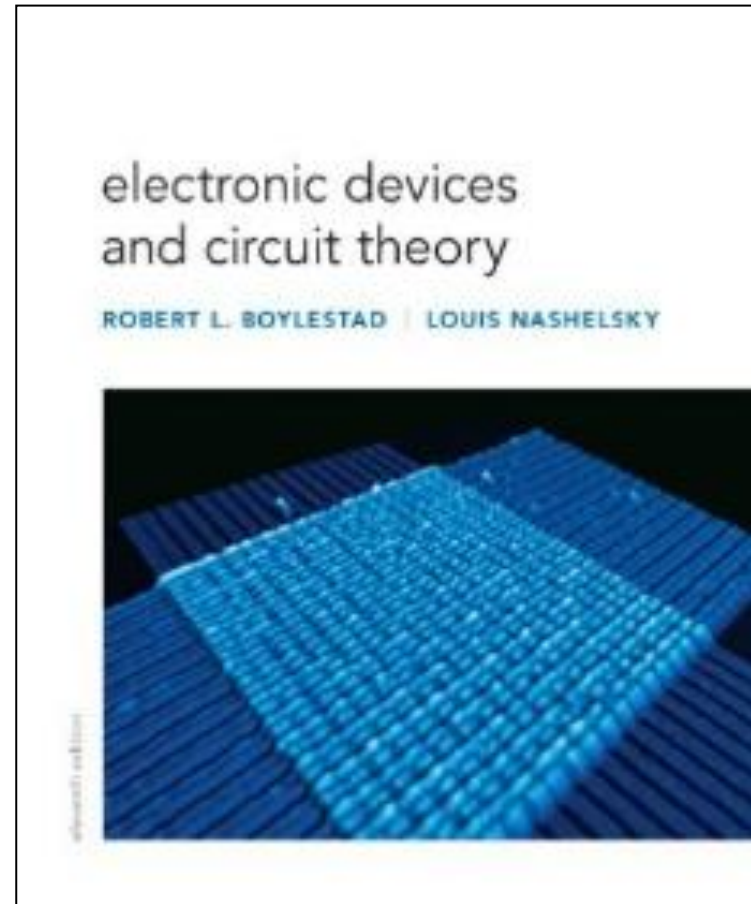
Diodos

Referências



Cap. 1 - Diodos Semicondutores

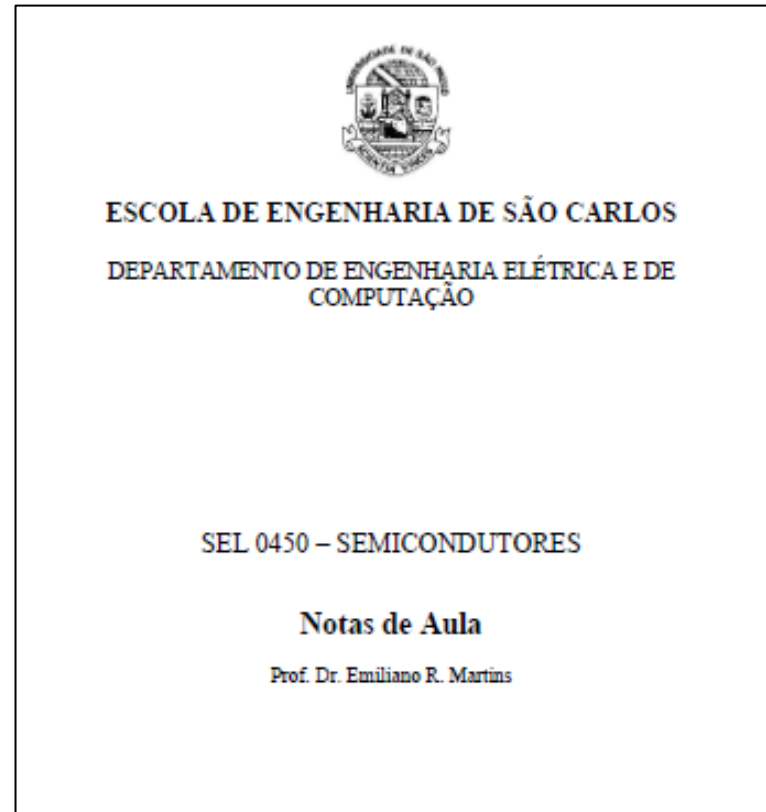
Cap. 2 – Aplicações de Diodos



Chapter 1 – Semiconductor Diodes

Chapter 2 – Diodes Applications

Referências (Apostilas)



Ementa – SEL0450



Júpiter - Sistema de Gestão Acadêmica da Pró-Reitoria de Graduação

Escola de Engenharia de São Carlos

Engenharia Elétrica e de Computação

Disciplina: SEL0450 - Semicondutores
Semiconductors

Créditos Aula: 2

Créditos Trabalho: 0

Carga Horária Total: 30 h

Tipo: Semestral

Ativação: 01/01/2019 **Desativação:**

Objetivos

Desenvolver a compreensão dos fundamentos dos diversos fenômenos físicos associados à materiais semicondutores e apresentar as diversas famílias de dispositivos utilizados em eletrônica e telecomunicações, discutindo os seus respectivos princípios de operação e propiciando uma introdução às técnicas de microeletrônica.

Docente(s) Responsável(eis)

3482251 - Emiliano Rezende Martins

8746344 - Leonardo André Ambrosio

2260189 - Murilo Araujo Romero

Programa Resumido

Átomos e Elétrons: fundamentos de Mecânica Quântica, Física do Estado Sólido e Física Estatística. Propriedades cristalinas, bandas de energia e portadores de carga em semicondutores. Princípio físico de operação de dispositivos eletrônicos semicondutores: diodos, transistores bipolares e FETs. Lasers e fotodetectores. Introdução às técnicas de fabricação em microeletrônica.

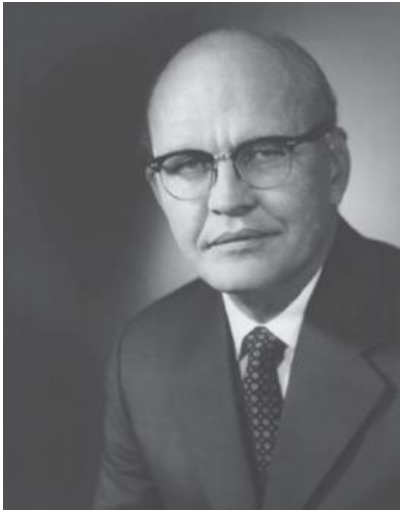
Programa

Átomos e Elétrons: fundamentos de Mecânica Quântica, Física do Estado Sólido e Física Estatística. Propriedades cristalinas, bandas de energia e portadores de carga em semicondutores. Princípio físico de operação de dispositivos eletrônicos semicondutores: diodos, transistores bipolares e FETs. Lasers e fotodetectores. Introdução às técnicas de fabricação em microeletrônica.

Introduction

1

The first IC was developed by Jack Kilby while working at Texas Instruments in 1958.



Jack St. Clair Kilby

Jack St. Clair Kilby, inventor do circuito integrado e coinventor da calculadora eletrônica portátil. (Cortesia da Texas Instruments.)

Natural de Jefferson City, Missouri, 1923. MS, Universidade de Wisconsin. Diretor de Engenharia e Tecnologia da Divisão de Componentes da Texas Instruments. Parceiro do IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers). Detém mais de 60 patentes nos EUA.



O primeiro circuito integrado, um oscilador de deslocamento de fase, inventado por Jack S. Kilby em 1958. (Cortesia da Texas Instruments.)

5Maio21

JORNAL DA USP

HOME CIÊNCIAS CULTURA ATUALIDADES UNIVERSIDADE

Home > Atualidades > Criação do primeiro chip de computador pela USP completa 50 anos

Criação do primeiro chip de computador pela USP completa 50 anos

A história da microeletrônica brasileira é contada por João Antonio Zuffo, criador do primeiro circuito integrado brasileiro

Atualidades / Jornal da USP no Ar / Jornal da USP no Ar 1ª edição / Rádio USP - 03/05/2021 - <https://jornal.usp.br/?p=410776>

FACEBOOK TWITTER WHATSAPP LINKEDIN EMAIL TELEGRAM PRINT

00:00 00:00

Rádio USP OUÇA AQUI EM TEMPO REAL



2

The **miniaturization** that has occurred in recent years leaves us to wonder about its limits. Complete systems now appear on wafers thousands of times smaller than the single element of earlier networks.

The first version of Intel core i7 Extreme edition processor has 731 million transistor in a package that is only slightly larger than 1.67 square inches.



1965

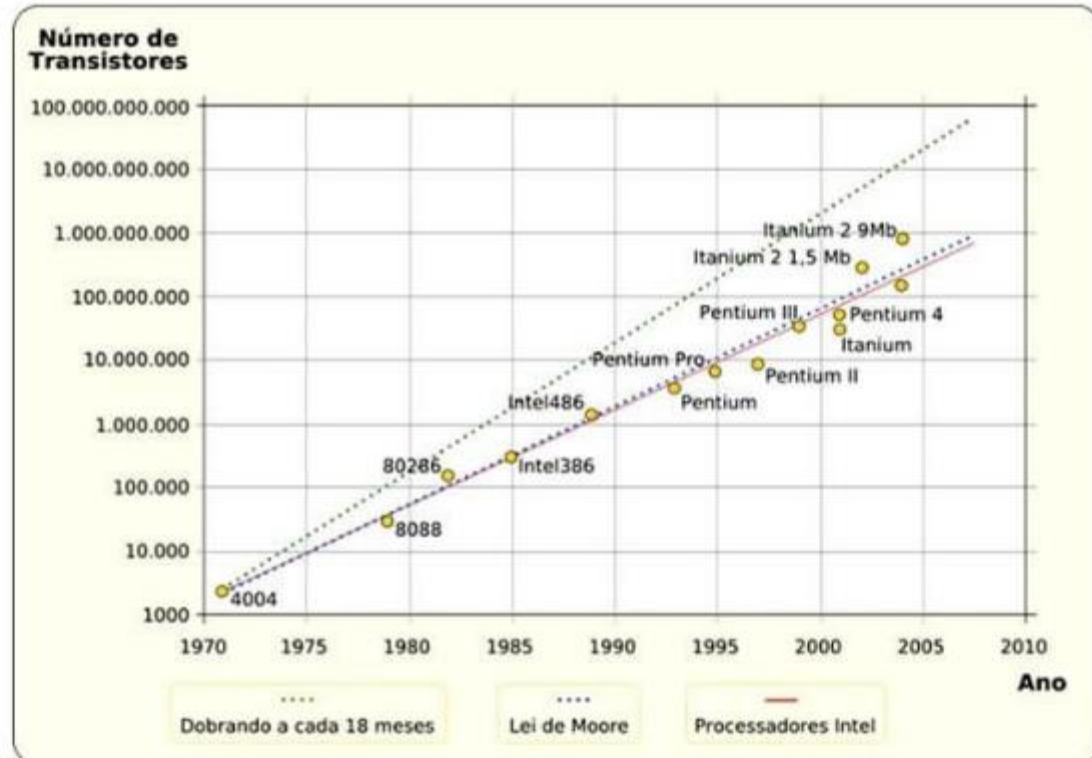
Dr. Gordon E Moore presented a paper predicting that the **transistor count in a single IC would double every two years.**

Now we find that his prediction is amazingly accurate and expected to continue to the next few decades.

Lei de Moore

- A lei de Moore diz que “A cada 18 a 24 meses é lançada uma nova tecnologia que permite que os computadores dupliquem o desempenho”

Se considerarmos 24 meses, a tecnologia Intel se encaixa perfeitamente nesta lei.



LAW OF ACCELERATING RETURNS

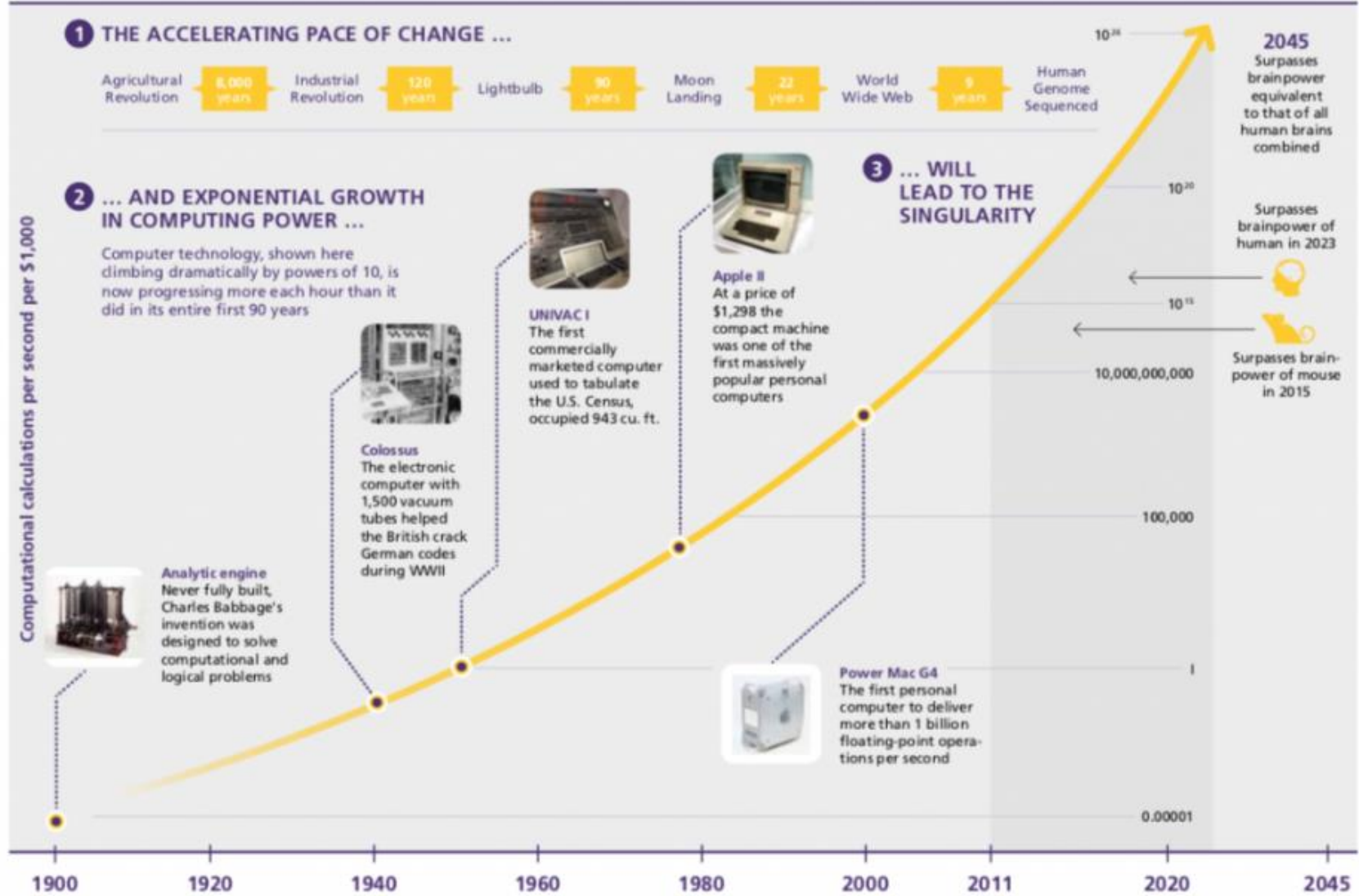


Figure 12: Ray Kurzweil's Law of Accelerating Returns depicts the growth of computer processing power and technology innovations throughout history, and anticipates computers will exceed human intelligence in the future; Source: TIME / Wikipedia

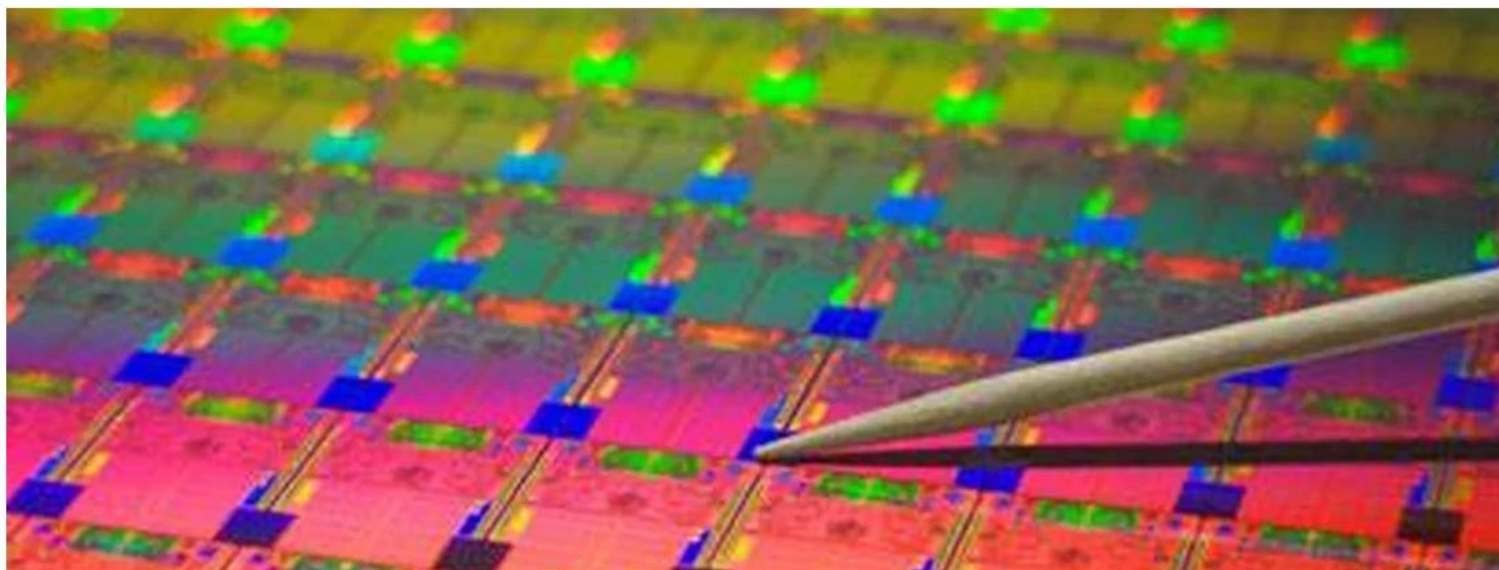
therocketsurgery.org

source dhl via @mikequindazzi

A era da Lei de Moore está caminhando para o fim

15/03/2012 às 15:10 • 3 min de leitura

COMPARTILHE



Texto

A Lei de Moore acabou!

23/03/2016

COMPARTILHE:

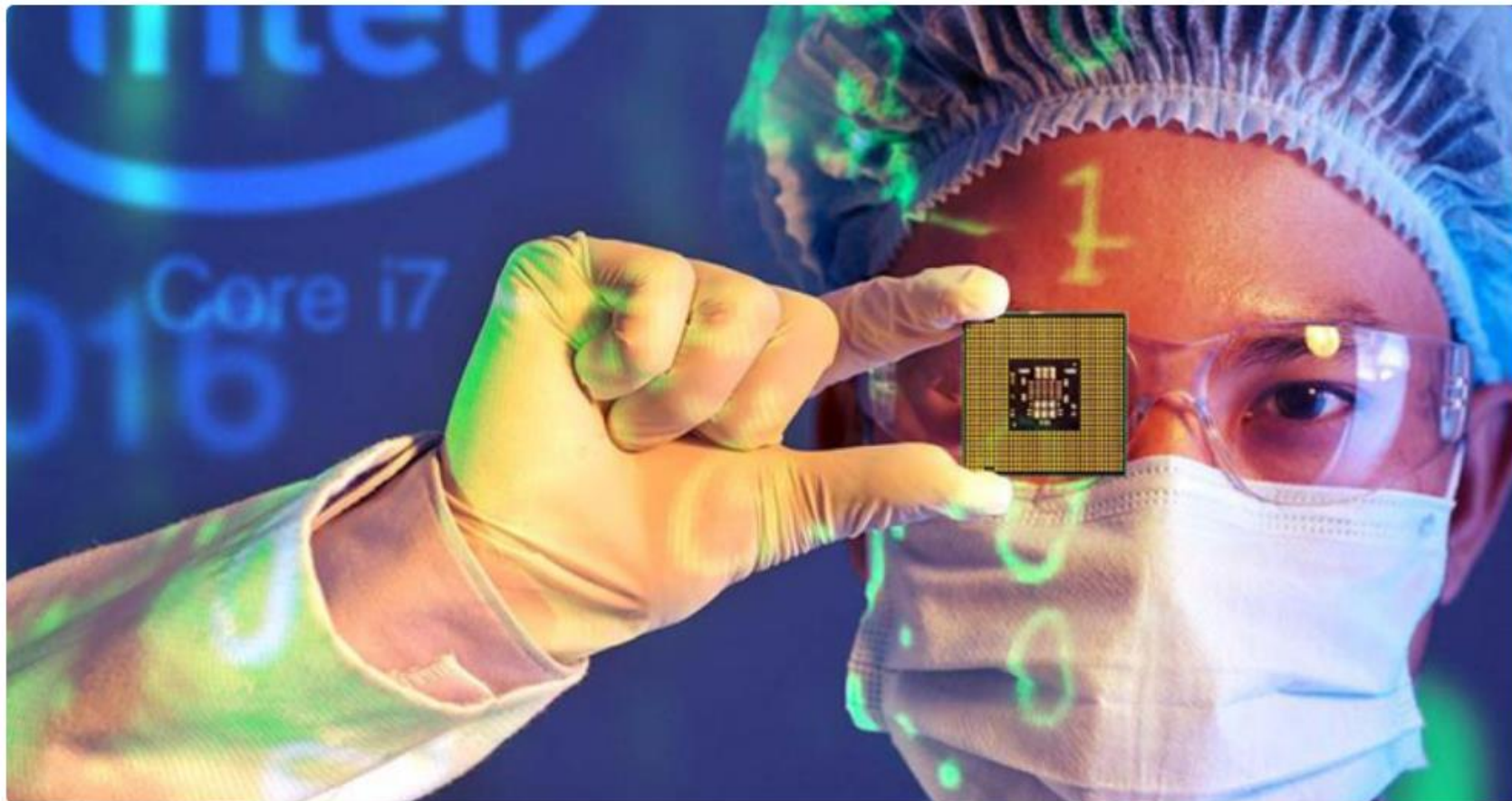


WHATSAPP



FACEBOOK

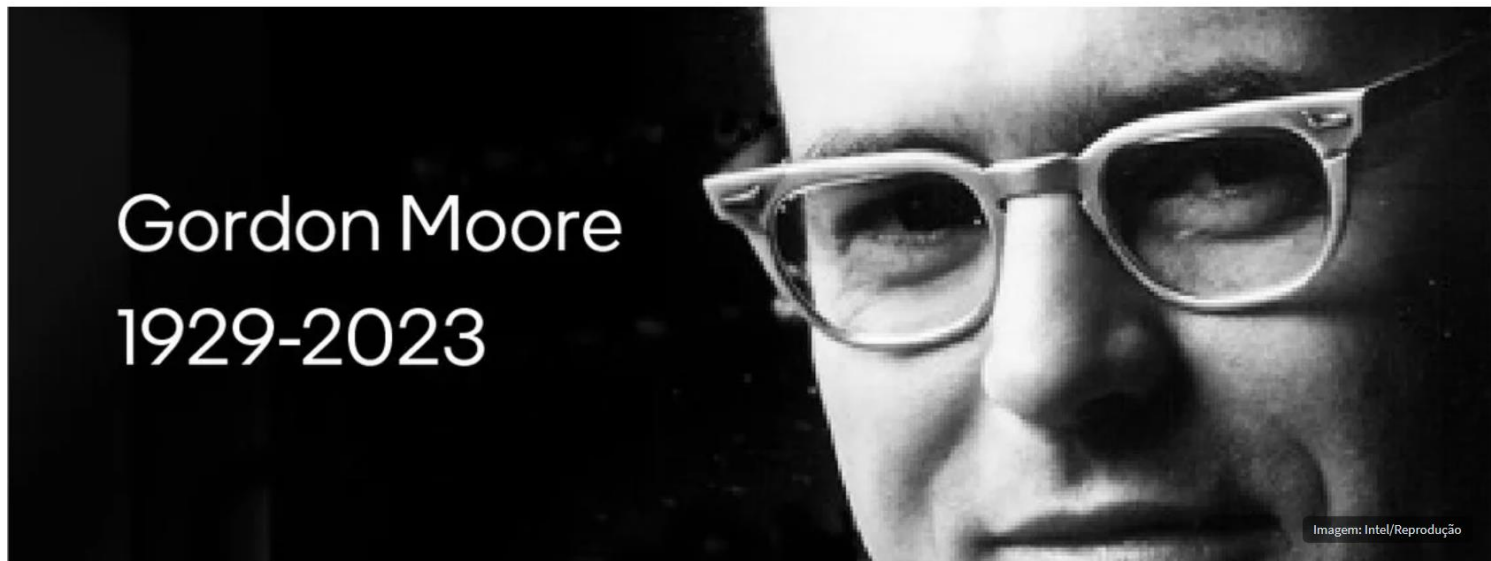
Por: William R. Plaza



Gordon Moore: fundador da Intel e criador da Lei de Moore morre aos 94 anos

27/03/2023 às 11:49 • 2 min de leitura

COMPARTILHE



Aléxis Cerqueira Góis
via nexperis

0 Compartilharam

Gordon Moore, pioneiro do [Vale do Silício](#) e cofundador da Intel, morreu aos 94 anos em sua casa no Havaí na sexta-feira (24). Ele foi uma figura central na história da eletrônica e suas inovações no design e fabricação de chips semicondutores ajudaram a lançar o Vale do Silício e transformar o computador na ferramenta onipresente da vida moderna.

- [30 anos do Intel Pentium: a história do processador que marcou uma geração](#)

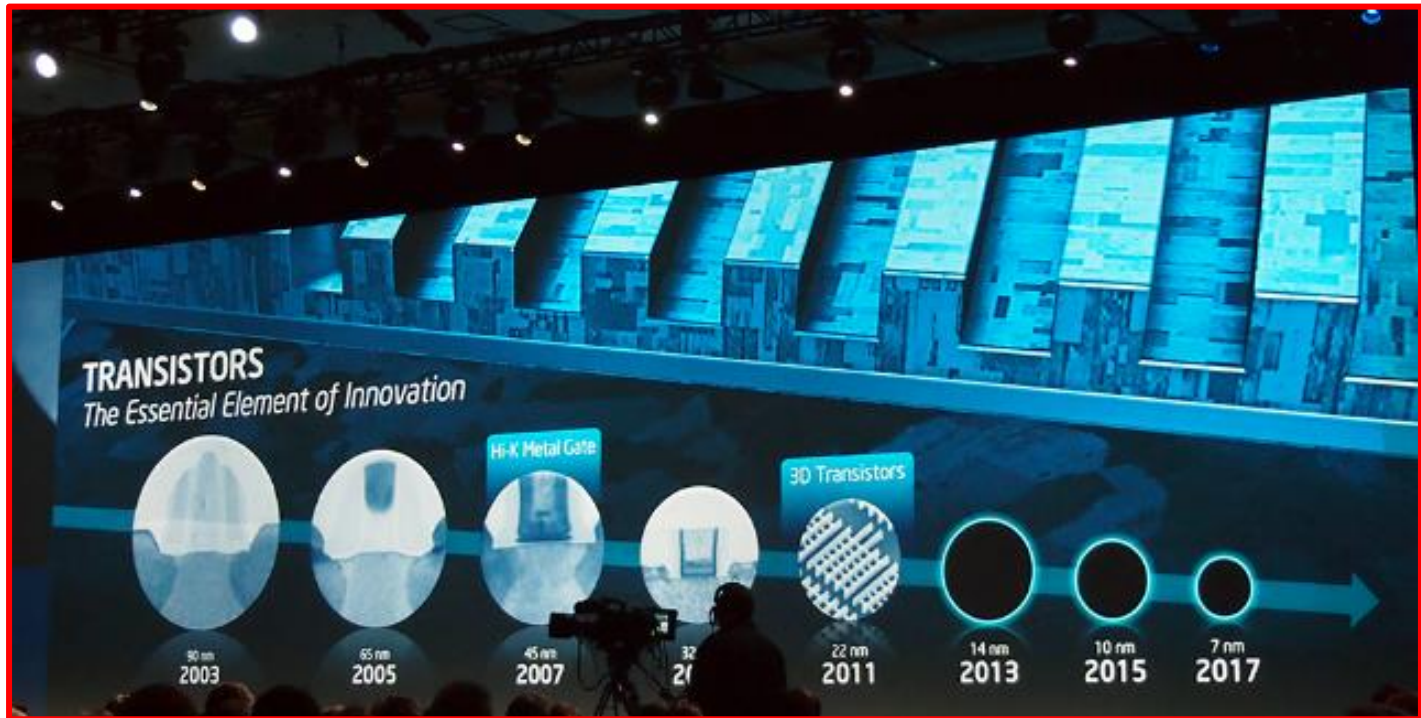
Canais Exclusivos



Aprenda Inglês Online



Realidade Violada



TECNOLOGIA

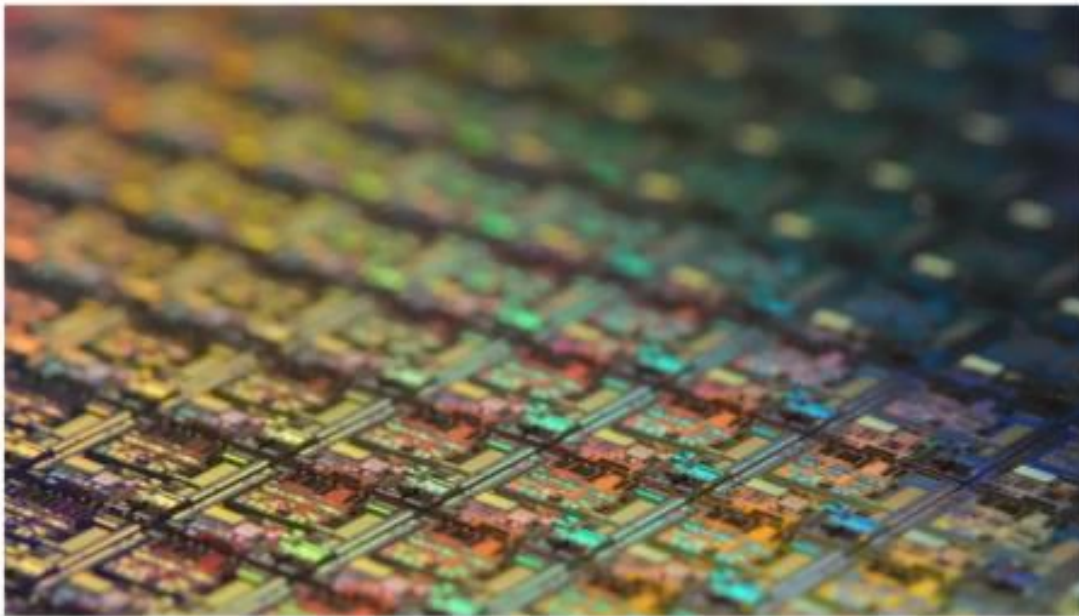
Pesquisadores chineses criam o menor gate de transistor do mundo

Por Depto de Redação – 11 de março de 2022 – Atualizado: 11 de março de 2022 – Nenhum comentário – 4 minutos de leitura

[Facebook](#)

[Twitter](#)

[Pinterest](#)



Semiconductor Materials (Ge, Si, GaAs)

Ge

O germânio tem produção limitada devido à sua sensibilidade à temperatura e à alta corrente de saturação reversa. Ainda está disponível comercialmente, mas limitado a algumas aplicações de alta velocidade (graças a um fator de mobilidade relativamente elevado) e a outras que usam sua sensibilidade à luz e ao calor, como fotodetectores e sistemas de segurança.

Si

Sem dúvida, o semicondutor mais utilizado para toda a gama de dispositivos eletrônicos. Tem a vantagem da pronta disponibilidade a um baixo custo e de uma corrente de saturação reversa relativamente baixa, além de características de temperatura adequada e excelentes níveis de tensão de ruptura. Também se beneficia de décadas de enorme atenção à concepção de circuitos integrados de grande escala e de tecnologia de processamento.

GaAs

Desde o início da década de 90, o interesse em GaAs vem crescendo a passos largos e acabará abarcando uma boa parcela do desenvolvimento dedicado aos dispositivos de silício, especialmente em circuitos integrados de grande escala. Suas características de alta velocidade têm maior demanda a cada dia, sem falar nos recursos adicionais de baixas correntes de saturação reversa, excelente sensibilidade à temperatura e elevadas tensões de ruptura. Mais de 80% de suas aplicações concentram-se na optoeletrônica, com o desenvolvimento de diodos emissores de luz, células solares e outros dispositivos fotodetectores, mas isso provavelmente mudará drasticamente à medida que seus custos de fabricação caírem e sua utilização em projetos de circuito integrado continuar a crescer. Talvez seja o material semicondutor do futuro.



3

Semiconductors are a special class of elements having a conductivity between that of a good conductor and that of an insulator.

Single Crystal: they have a repetitive crystal structure.

Si
Ge

Compound: they are constructed of two or more semiconductor materials of different atomic structures

GaAs
CdS
GaN
GaAsP

1930

Diode discovery

1947

Transistor discovery

Ge

Relatively easy to refine and obtain very high levels of purity by **suffered from low levels of reliability due to sensitivity to changes in temperature.**

1954

1st Si transistor was introduced

Si

Less temperature sensitivity, very abundant on Earth and cheaper to manufacture.

1970

1st GaAs transistor was introduced

GaAs

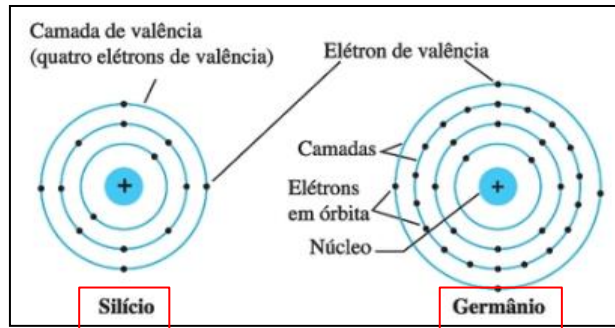
Up to five times the speed of operations with Si.



Si is still the fundamental building block for Intel's processors !

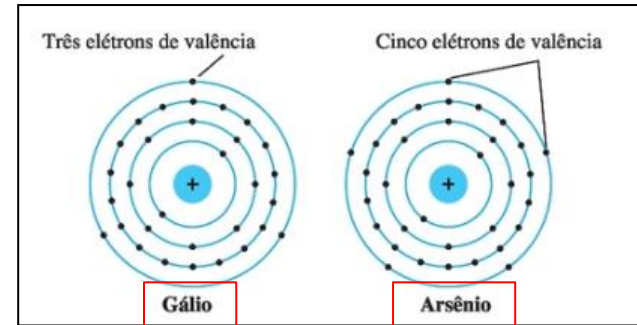
n=14

n=32

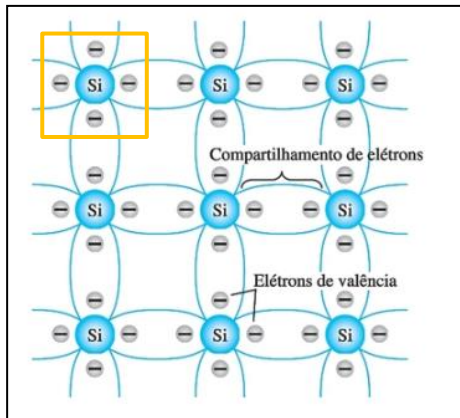


n=31

n=33

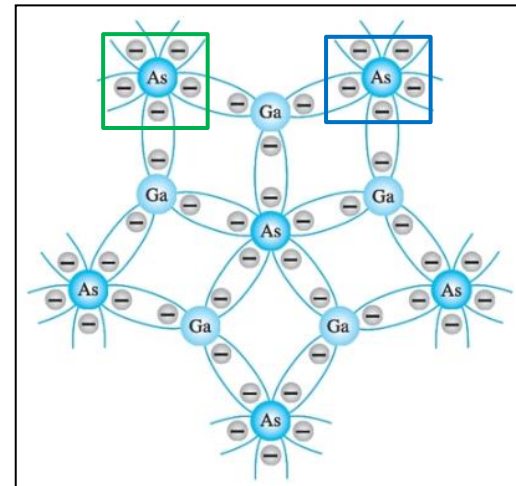


singular cristal



ligação covalente - Si

cristal composto



ligação covalente - GaAs

4

Although the covalent bond will result in a stronger bond between the valence electrons and their parent atom, its possible for the valence electron to absorb sufficient kinetic energy from external causes and:

- To break the covalent bond and assume “free” state.
At room temperature there are 15 billion electrons /cm³ in a silicon material.
- The free electrons are very sensitive to any electric fields such as established by voltage sources.

Intrinsic carriers n_i
(free e^- in the material)

Semiconductor	Portadores intrínsecos (por cm^3)
GaAs	$1,7 \times 10^6$
Si	$1,5 \times 10^{10}$
Ge	$2,5 \times 10^{13}$

Intrinsic: means any semiconductor material that has been carefully refined to reduce the number of impurities to a very low level.

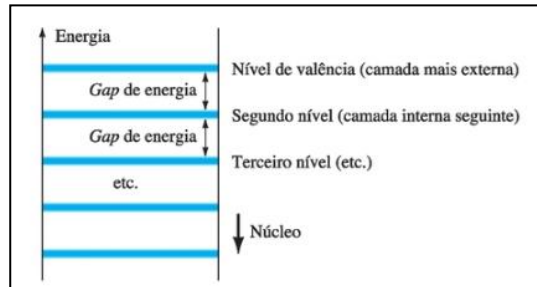
Note: impurity levels of 1 part in 10 billion are common today.

Relative mobility factor μ_n ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)
(free e^- in the material)

Semiconductor	μ_n ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)
Si	1500
Ge	3900
GaAs	8500

μ_n : ability of the free carriers to move throughout the material.

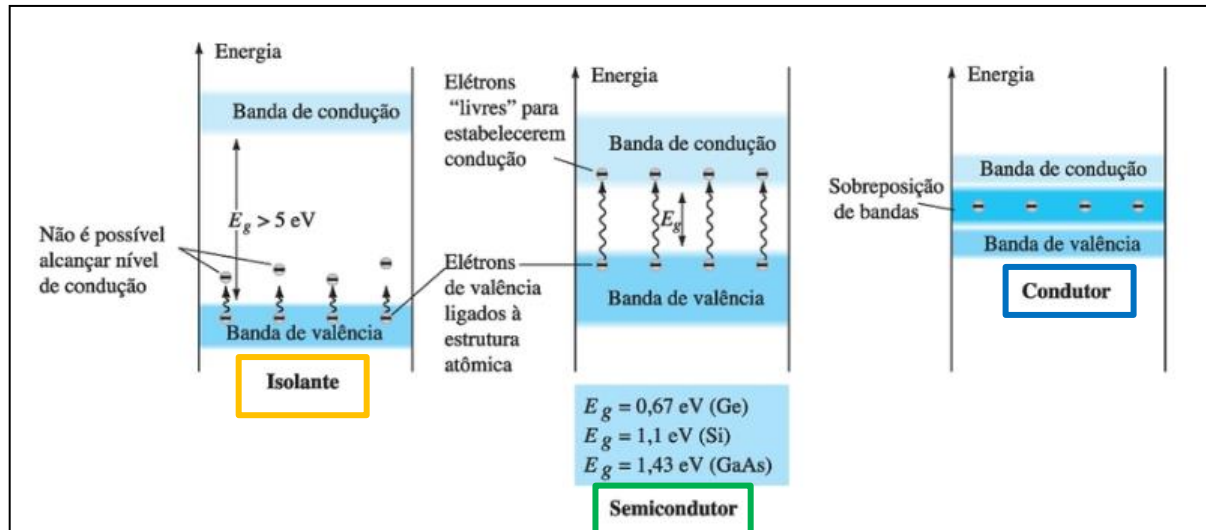
Níveis específicos discretos de energia



$$\begin{aligned}
 W &= QV \\
 &= (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) (1 \text{ V}) \\
 &= 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}
 \end{aligned}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

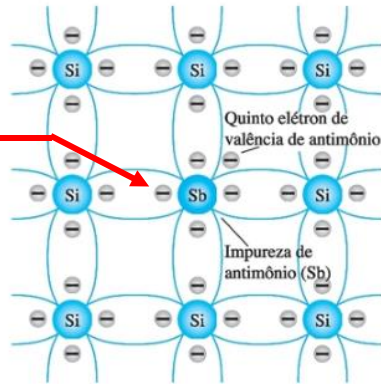
Bandas de valência e de condução



IMPURITY

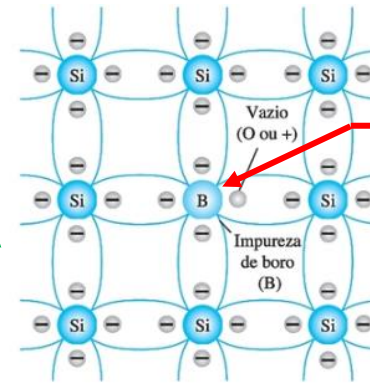
Impurity: At room temperature in an intrinsic Si there is about one free electron for every 10^{12} atoms.

Five valence electrons



(extrinsic material)

Three valence electrons

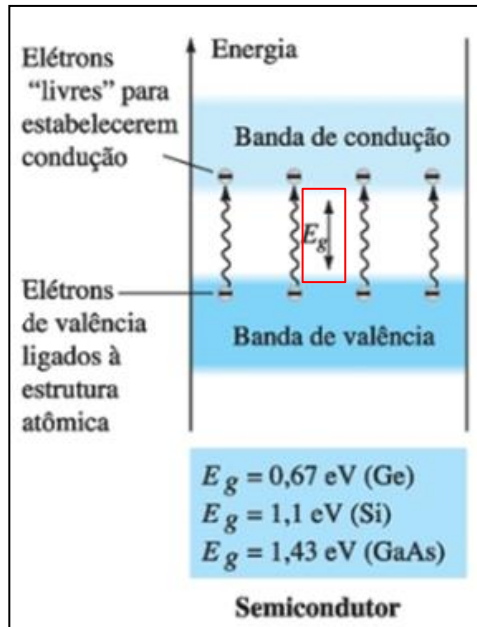


Sb (or Ar, P)
impurity in **n-type material**

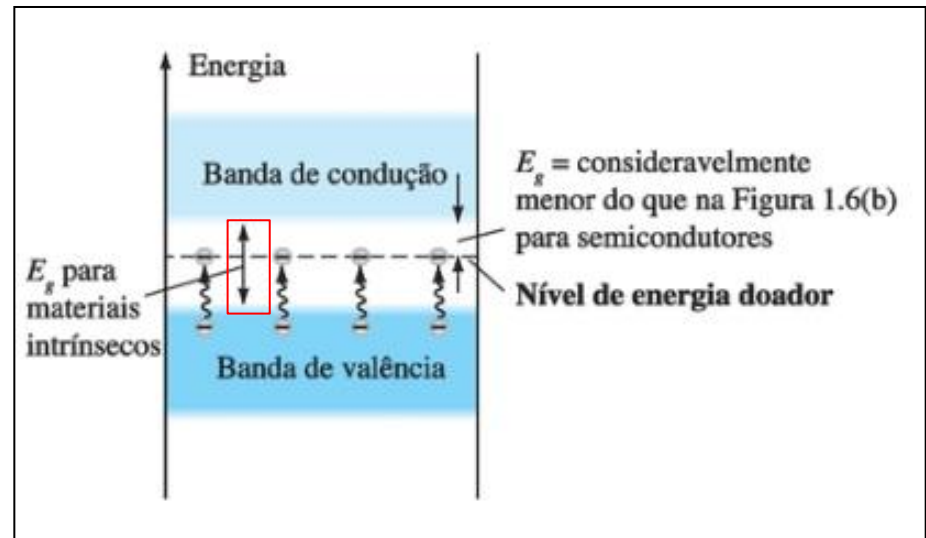
B (or Ga, In)
impurity in **p-type material**

In a n-type material if the dosage level is 1 part in 10^7 the ratio $10^{12} / 10^7 = 10^5$ indicates that in a n-type material the **carrier concentration** has increased 100.000.

Intrínseco



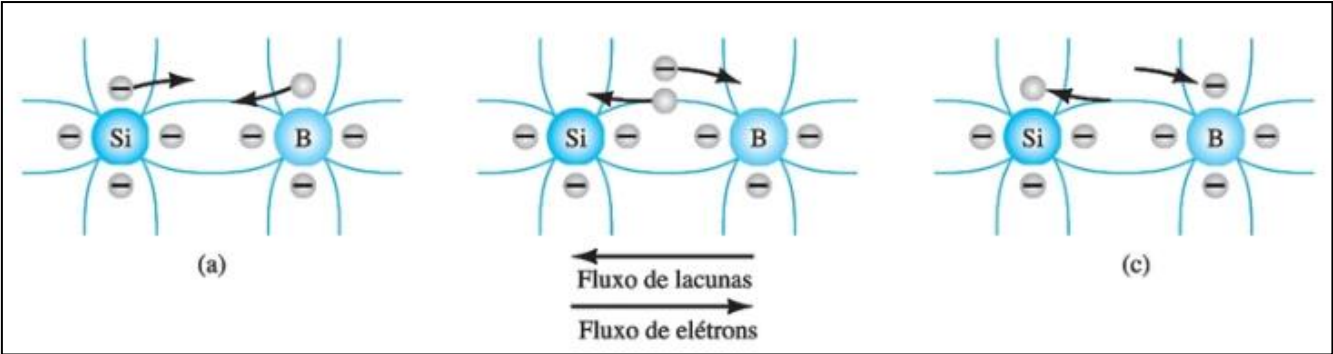
Impuros



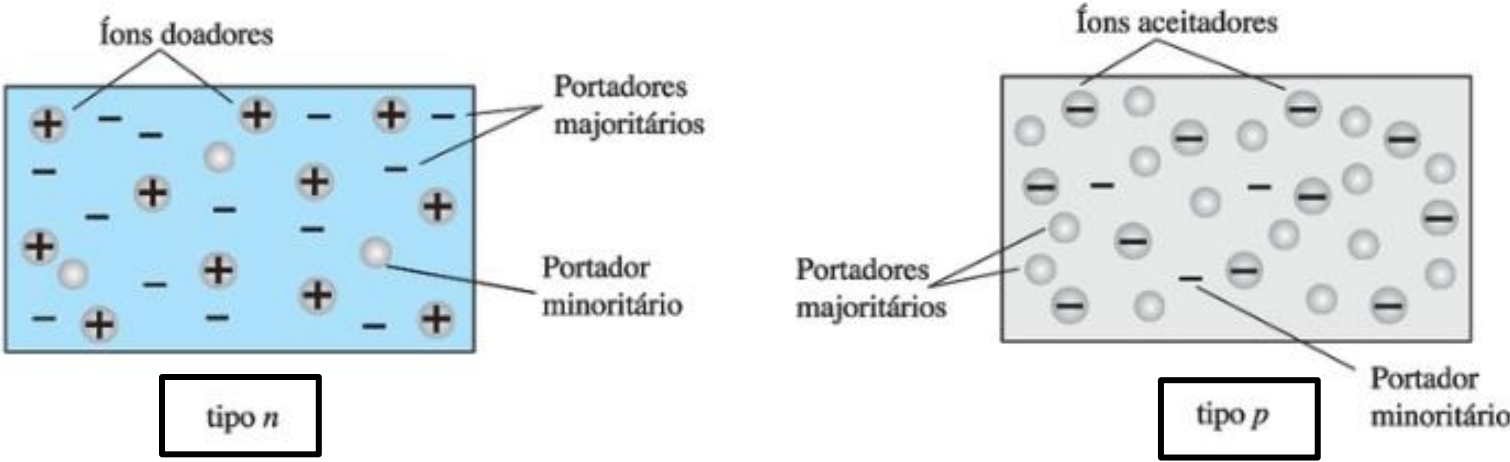
A discrete energy level (donor level) appears in the forbidden band with an E_g significantly less than that of the intrinsic material.

The result is that at room temperature, there are a large number of carriers (electrons) in the conduction level and the conductivity of the material is increases significantly.

Electrons X Hole flow



Building blocks of semiconductor devices



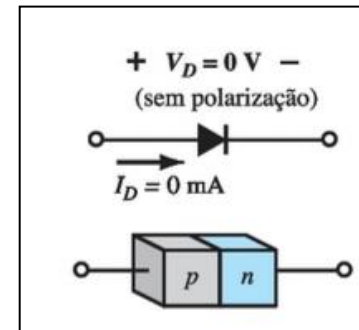
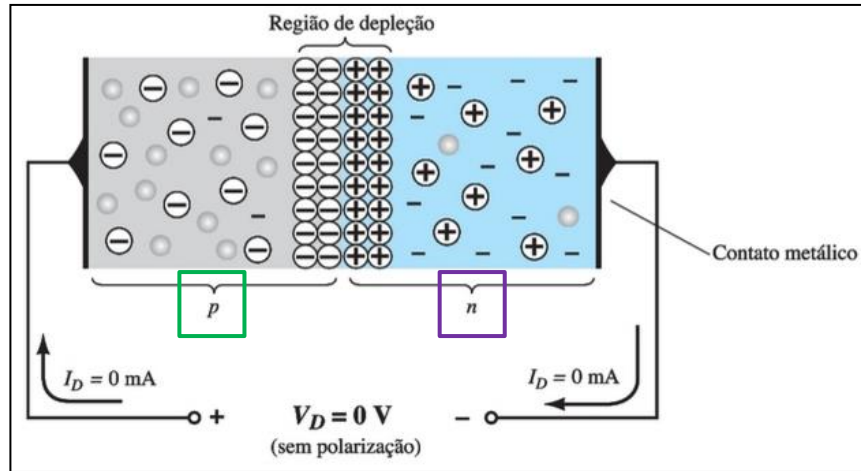
Junção

- É o contato íntimo entre dois materiais que possuem estruturas energéticas internas diferentes.
- Podem ser executadas entre **dois metais**, entre um **metal e um semicondutor**, entre **dois semicondutores** ou através do contato íntimo entre **dois cristais dopados com impurezas de polaridades opostas, embora pertencentes ao mesmo semicondutor intrínseco**. Neste último caso o dispositivo é chamado de **junção pn**, parte básica da eletrônica moderna de estado sólido.
- **Junções pn formam um componente eletrônico denominado DIODO !**

No Applied Voltage

$$(V_D = 0)$$

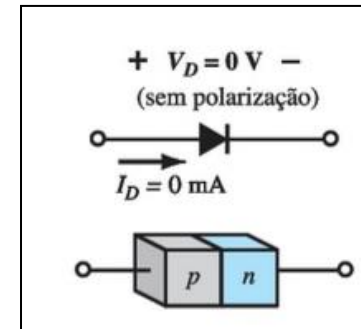
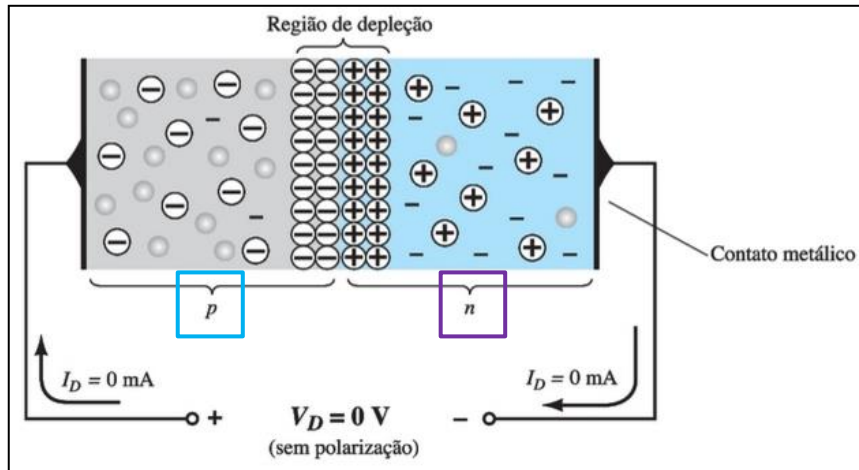
Bias: refers to the application of an external voltage across the two terminals of the device to extract a response.



Any minority carrier (holes) in the n-type material within the depletion region will pass quickly into the p-type material.

The closer the hole is to the junction, the greater is **the attraction for the layer of negative ions** and the less is the opposition offered by the positive ions in the depletion region of the n-type material.

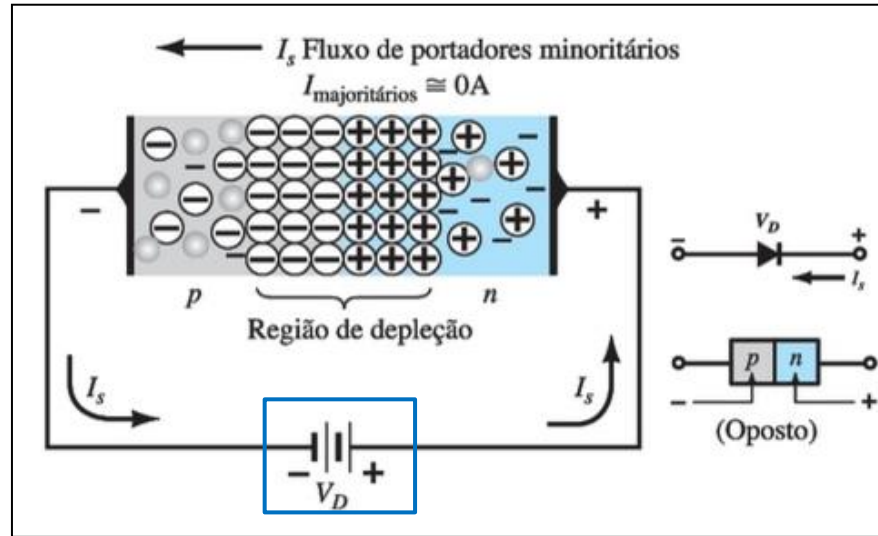
The same will happen with the minority carrier (electrons) in the p-type material.



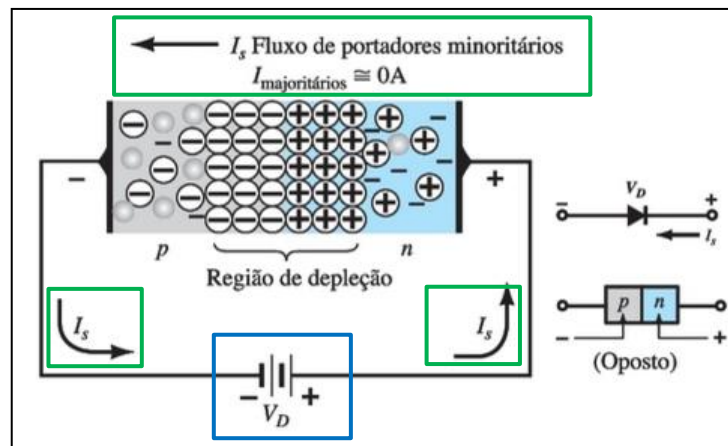
The electrons and holes in the region of the junction will combine resulting in a lack of free carriers in the region near the junction !

Reverse-Bias

$$(V_D < 0)$$



- The number of positive ions in the depletion region of the n-type material will increase due to the large numbers of free electrons drawn to the positive potential of the applied voltage.
- For similar reasons, the number of negative ions will increase in the p-type material
- The net effect, therefore, is a widening of the depletion region.



This widening of the depletion region will establish a barrier for the majority carriers to overcome, effectively **reducing the majority carrier flow to zero**.

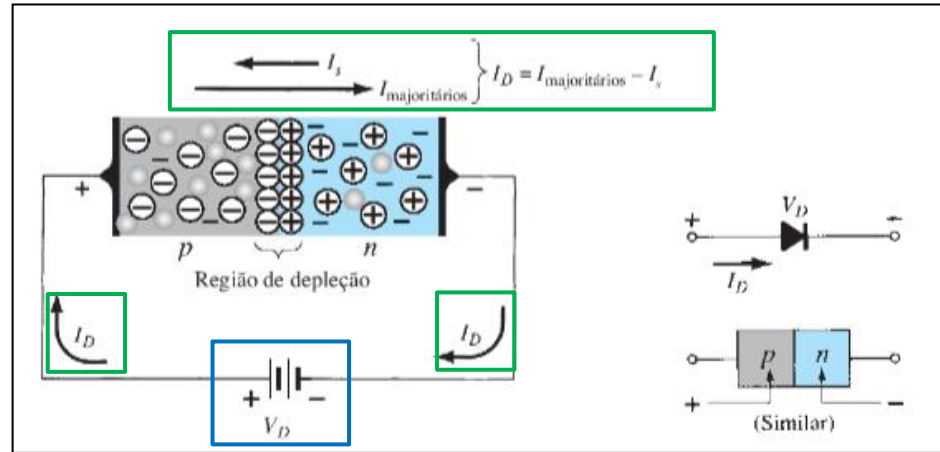
The number of minority carriers, however, entering the depletion region will not change.

The current that exists under reverse-bias conditions is called **reverse saturation curve** (I_s)

The I_s is **seldom more than a few μA and typically nA**. The term saturation comes from the fact that it reaches its maximum level quickly and does not change significantly with increases in the reverse bias potential.

Forward-Bias

$$(V_D > 0)$$



The application of a forward-bias will “pressure” **elétrons in the n-type material and holes in the p-type material to recombine with the ions near the boundary and reduce the width of the depletion region.**

A electron of the n-type material now “sees” a reduced barrier at the junction due to reduced depletion region and a strong attraction for the positive potential applied to the p-type material.

As the applied bias increases, the depletion region will continue to decrease in width until a flood of electrons can pass through the junction, **resulting in an exponential rise in current.**

Resumo

Doping

The electrical characteristics of silicon and germanium are improved by adding materials in a process called **doping**.

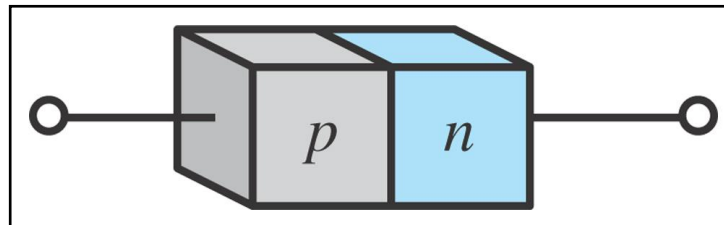
n-type

Materials contain an excess of conduction band electrons.

p-type

Materials contain an excess of valence band holes.

One end of a silicon or germanium crystal can be doped as a p-type material and the other end as an n-type material. The result is a **p-n junction**.

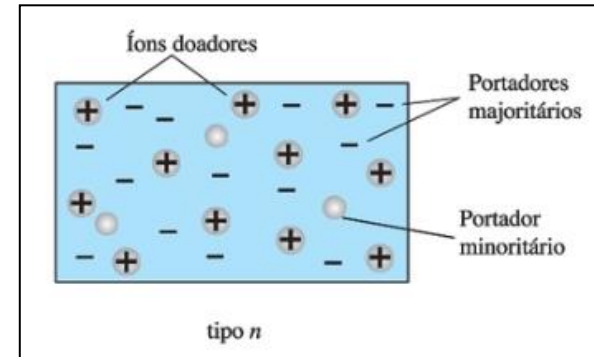


Majority and Minority Carriers (Two currents through a diode)

Majority Carriers

The majority carriers in ***n-type*** materials are electrons.

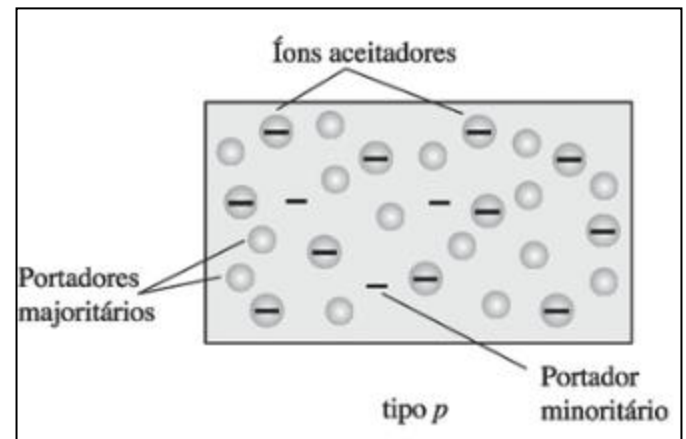
The majority carriers in ***p-type*** materials are holes.



Minority Carriers

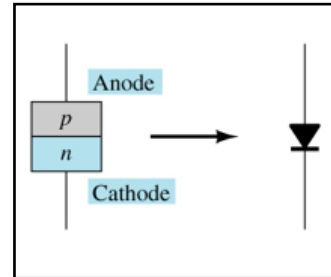
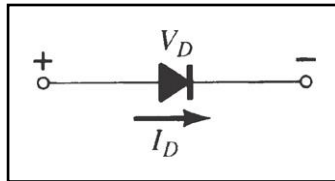
The minority carriers in ***n-type*** materials are holes.

The minority carriers in ***p-type*** materials are electrons.



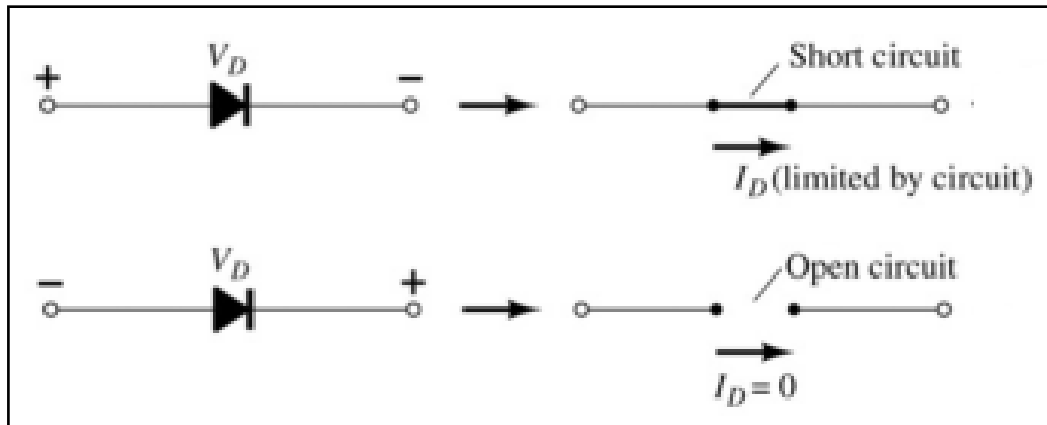
Diodes

The diode is a 2-terminal device.



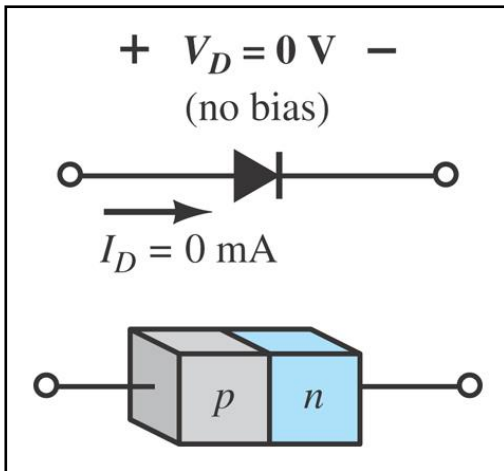
The anode is abbreviated A
The cathode is abbreviated K

A diode ideally conducts in only one direction.



Diode Operating Conditions

No Bias



No external voltage is applied

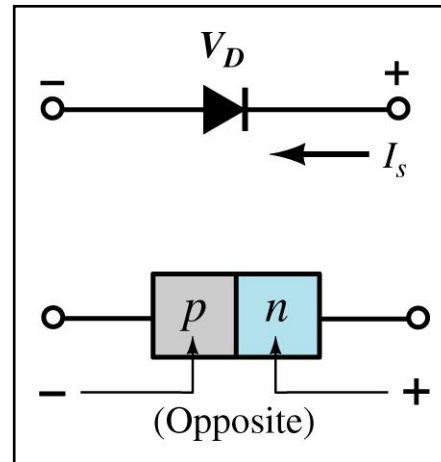
$$(V_D = 0 \text{ V})$$

There is no diode current:

$$(I_D = 0 \text{ A})$$

Only a modest depletion region exists

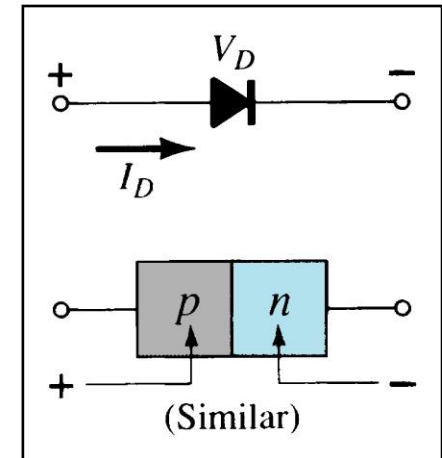
Reverse Bias



External voltage is applied

across the p - n junction in the opposite polarity of the p - and n -type materials.

Forward Bias



External voltage is applied

across the p - n junction in the same polarity as the p - and n -type materials.

Equação de Shockley

Corrente (I_D) – Tensão (V_D)

$$I_D = I_S(e^{V_D/nV_T} - 1) \quad (\text{A})$$

$$V_T = \frac{kT_K}{q} \quad (\text{V})$$

k é a constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K
 T_K é a temperatura absoluta em Kelvin = 273 + temperatura em °C
 q é a magnitude da carga eletrônica = $1,6 \times 10^{-19}$ C

$$I_S = Aqn_i^2 \left(\frac{D_P}{L_P N_D} + \frac{D_n}{L_N N_A} \right)$$

V_T - tensão térmica

V_D - tensão no diodo

$1 < n < 2$ - is an ideally factor which a function of the operating conditions and physical construction
 ($n = 1$ (integrated circuits diode) | $n = 2$ (discrete diodes))

A [cm^2] - área da seção transversal da junção

q [C] - carga do eletron

n_i [cm^3] - number of free electrons and holes in a unit volume of intrinsic silicon at a given temperature.

D_n [cm^2/s] - constante de difusão de elétrons

D_p [cm^2/s] - constante de difusão de lacunas

N_d [cm^{-3}] - concentração de dopantes, considerada uniforme

N_a [cm^{-3}] - concentração de dopantes, considerada uniforme

L_p [cm] - comprimento de difusão de buracos

L_n [cm] - comprimento de difusão de elétrons

Thermal generation results in free electrons and holes in equal numbers and hence equal concentrations, where concentration refers to the number of charge carriers per unit volume (cm^3).

The free electrons and holes move randomly through the silicon crystal structure, and in the process some electrons may fill some of the holes. This process, called **recombination**, results in the disappearance of free electrons and holes.

The recombination rate is proportional to the number of free electrons and holes, which in turn is determined by the thermal generation rate. The latter is a strong function of temperature.

In thermal equilibrium, the recombination rate is equal to the generation rate, and one can conclude that the concentration of free electrons n is equal to the concentration of holes p , $n = p = n_i$

n_i denotes the number of free electrons and holes in a unit volume (cm^3) of intrinsic silicon at a given temperature.

Thermal Voltage

$n=1$



$$V_T = \frac{kT_K}{q} \quad (\text{V})$$



$$\begin{aligned} T &= 273 + ^\circ\text{C} = 273 + 27 = 300 \text{ K} \\ V_T &= \frac{kT_K}{q} = \frac{(1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(300 \text{ K})}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} \\ &= 25,875 \text{ mV} \cong 26 \text{ mV} \end{aligned}$$

Exercício

A silicon diode said to be a 1-mA device displays a forward voltage of 0.7 V at a current of 1 mA. Evaluate the junction scaling constant I_S .

$$i = I_S e^{v/nV_T} \quad \rightarrow \quad I_S = i e^{-v/nV_T}$$

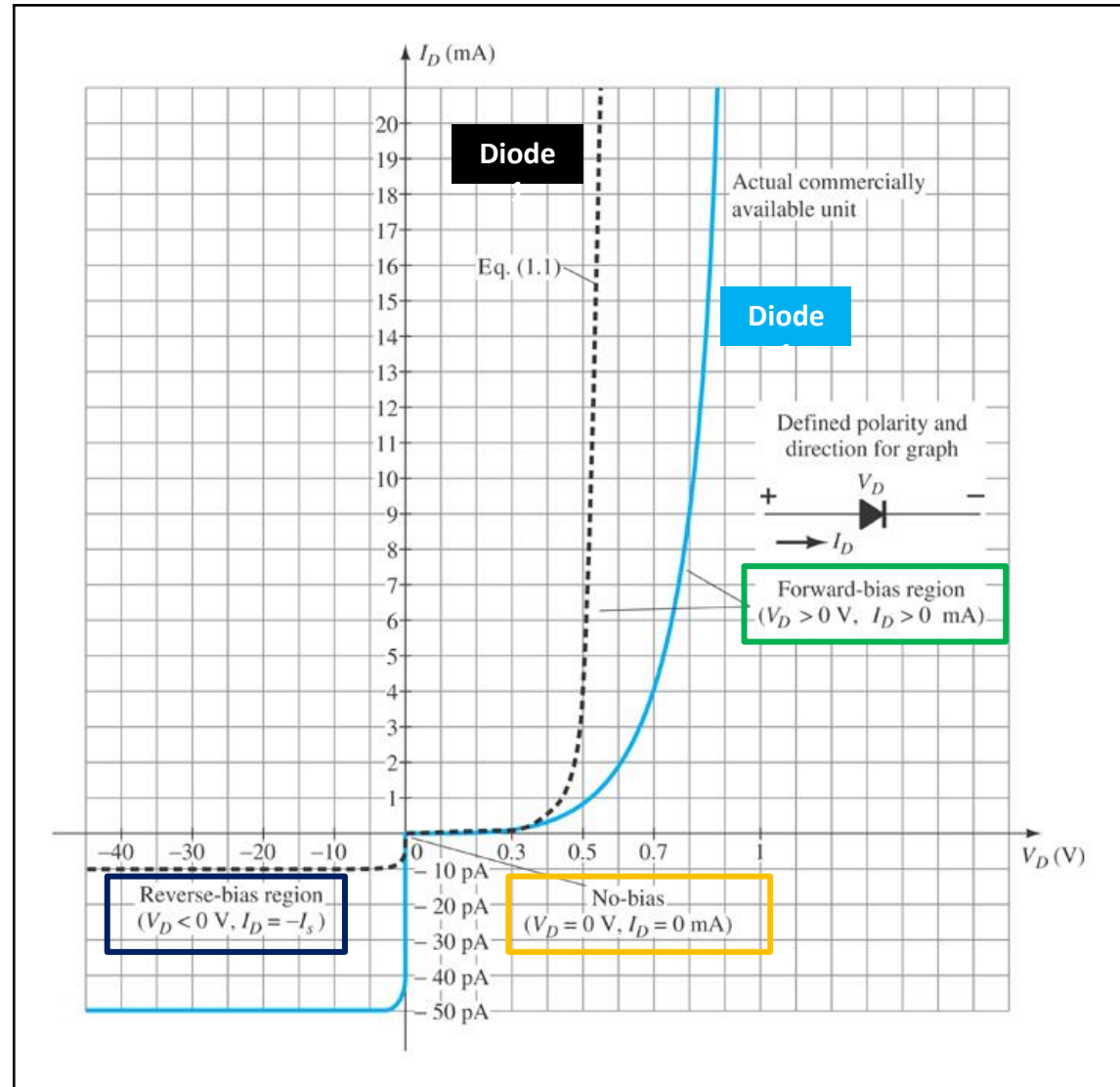
$$\mathbf{n=1} \quad \rightarrow \quad I_S = 6,9 \times 10^{-16} \text{ A} \approx 10^{-15} \text{ A}$$

$$\mathbf{n=2} \quad \rightarrow \quad I_S = 8,3 \times 10^{-10} \text{ A} \approx 10^{-9} \text{ A}$$

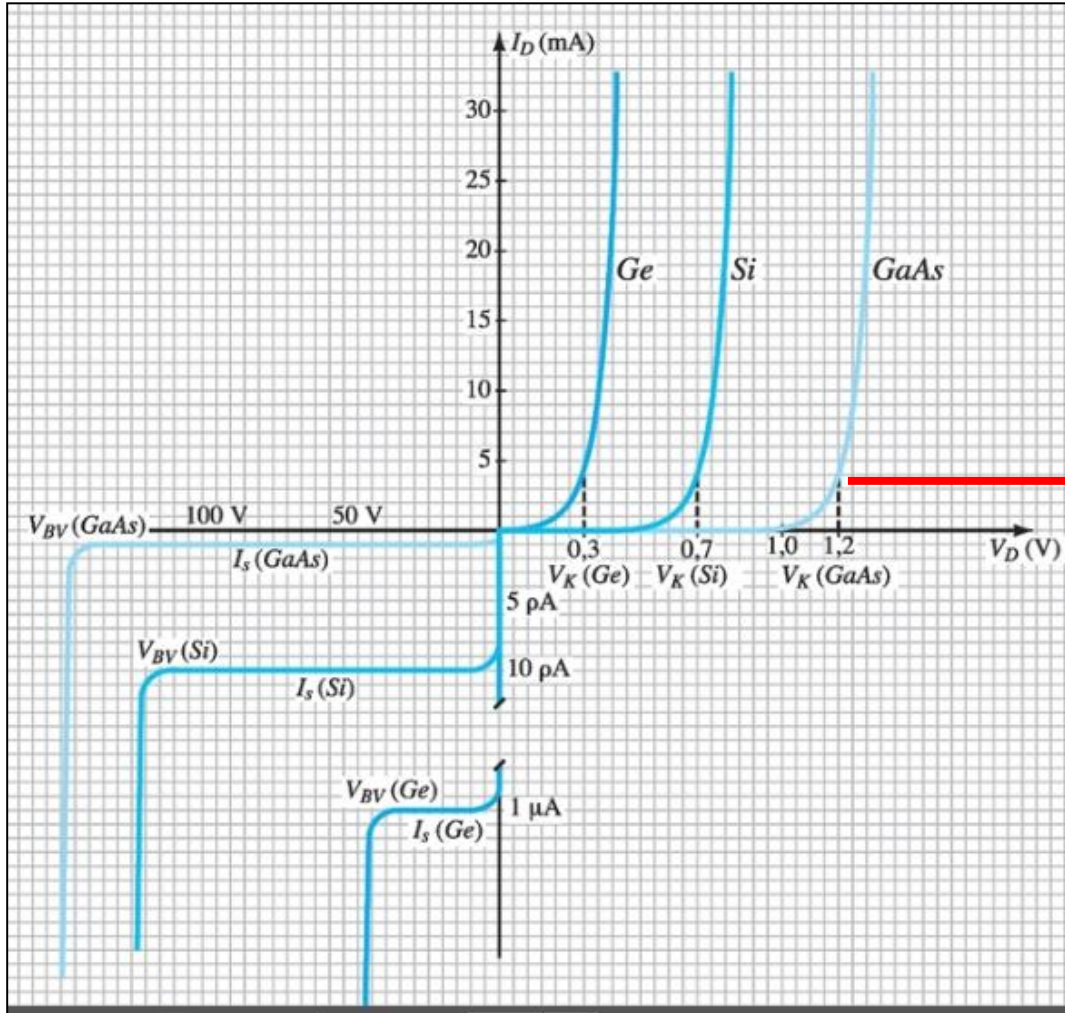
Diode Characteristics

Actual Diode Characteristics

Note the scale for each of these conditions !



Ge, Si and GaAs

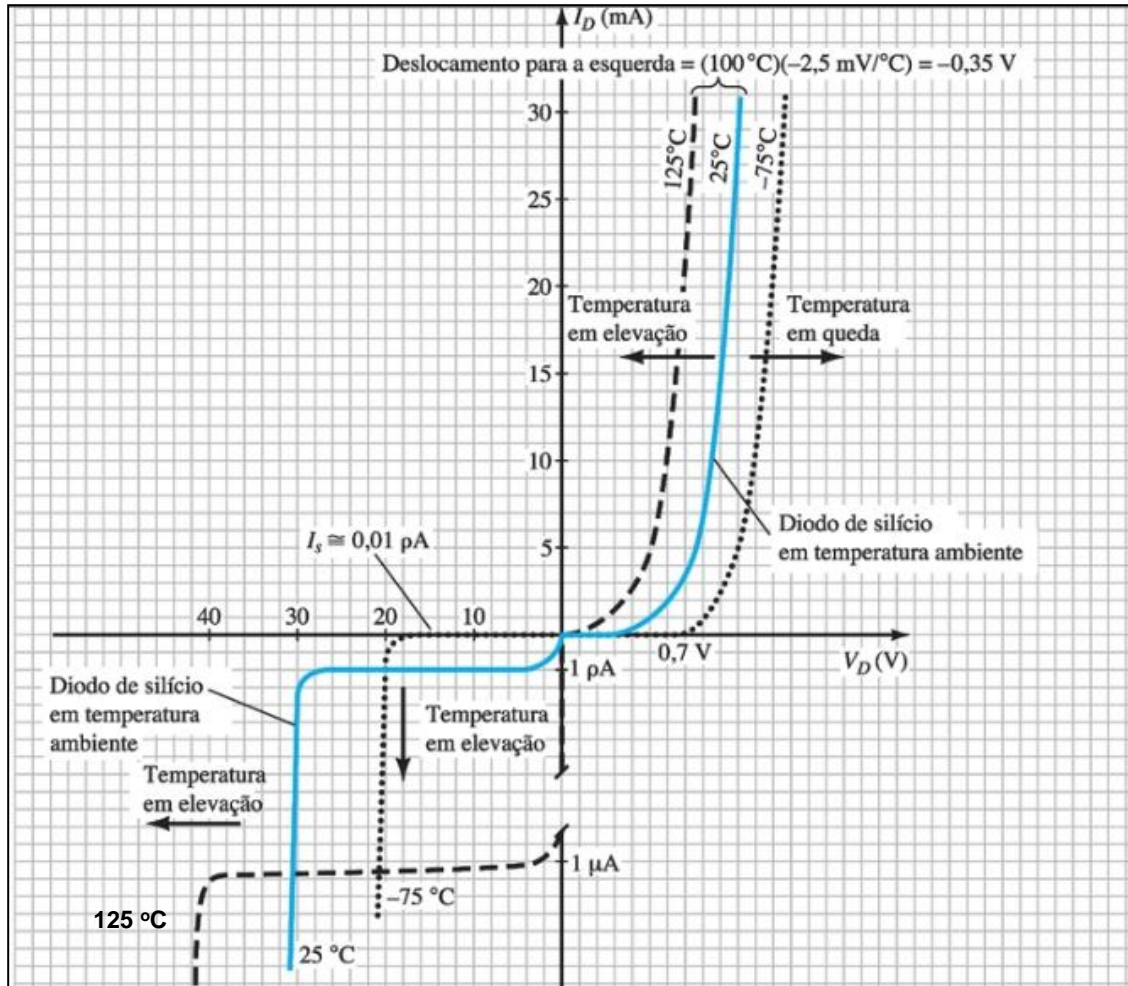


Knee Voltages (V_K)

Semiconductor	V_K (V)
Ge	0,3
Si	0,7
GaAs	1,2

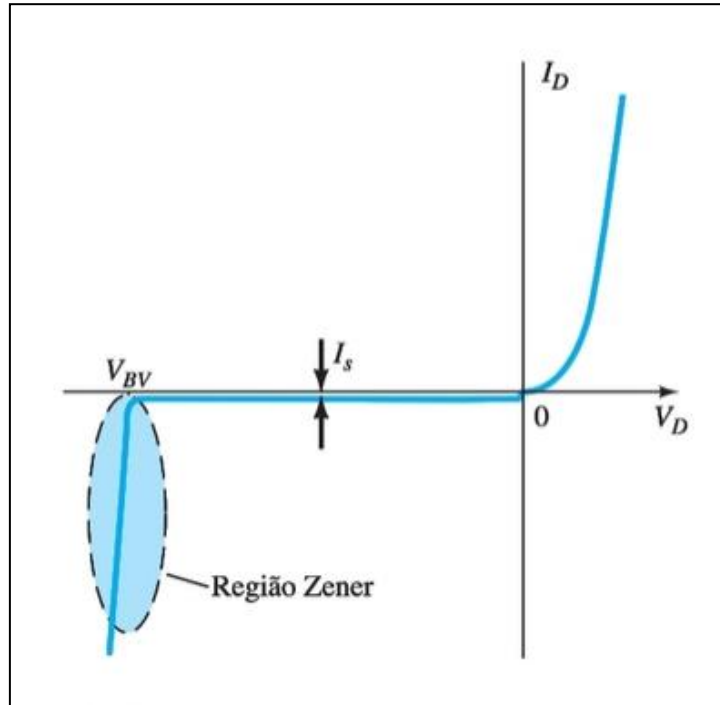
center of the knee

Temperature Effects



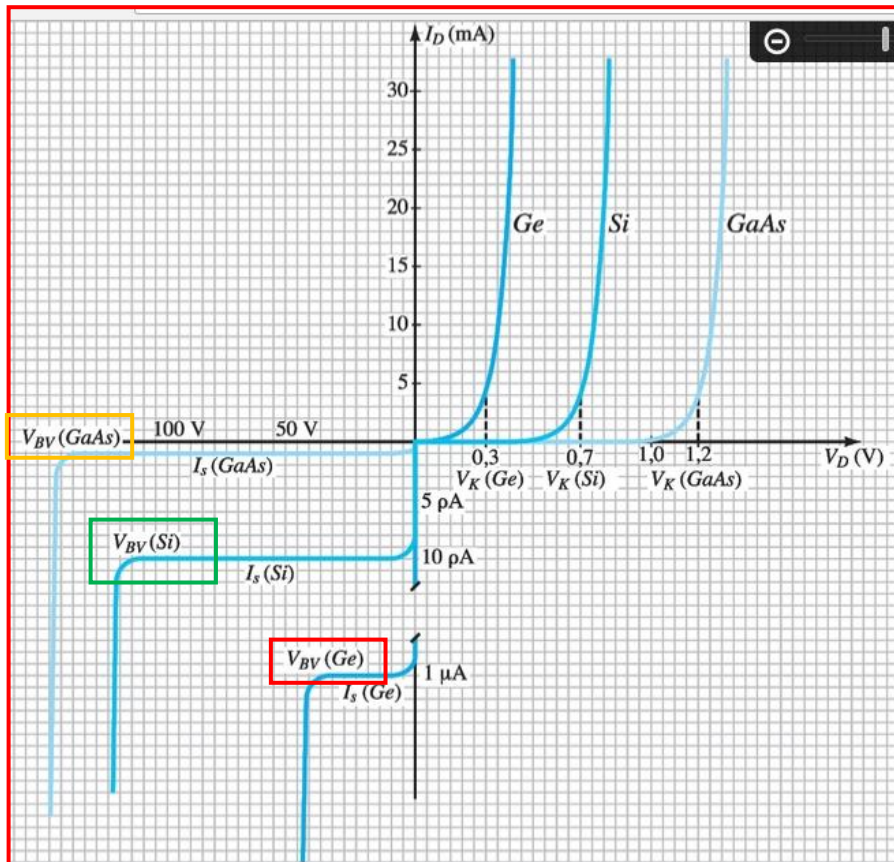
Germanium diodes are more sensitive to temperature variations than silicon or gallium arsenide diodes !

Breakdown Voltage (BV)



As the voltage across the diode increases in the reverse-bias region, the velocity of the minority carriers responsible for the reverse saturation current (I_s) will also increase. Eventually their velocity and associated kinetic energy will be sufficient to release additional carriers through collisions with otherwise stable atomic structures.

That is, **an ionization process will result** whereby valence electrons absorb sufficient energy to leave the parent atom. The additional carriers can then aid the ionization process to the point where a high avalanche current is established and the avalanche breakdown region determined.

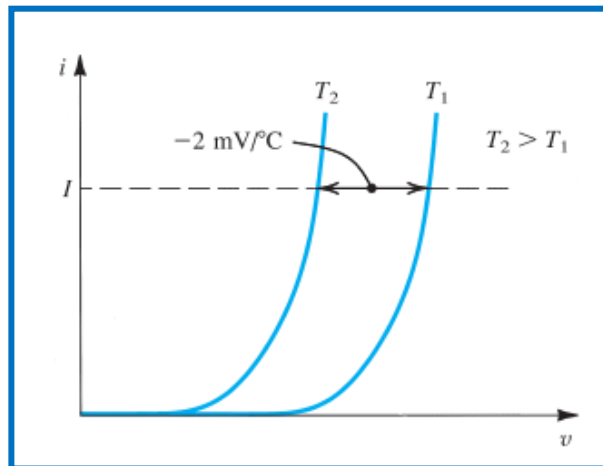
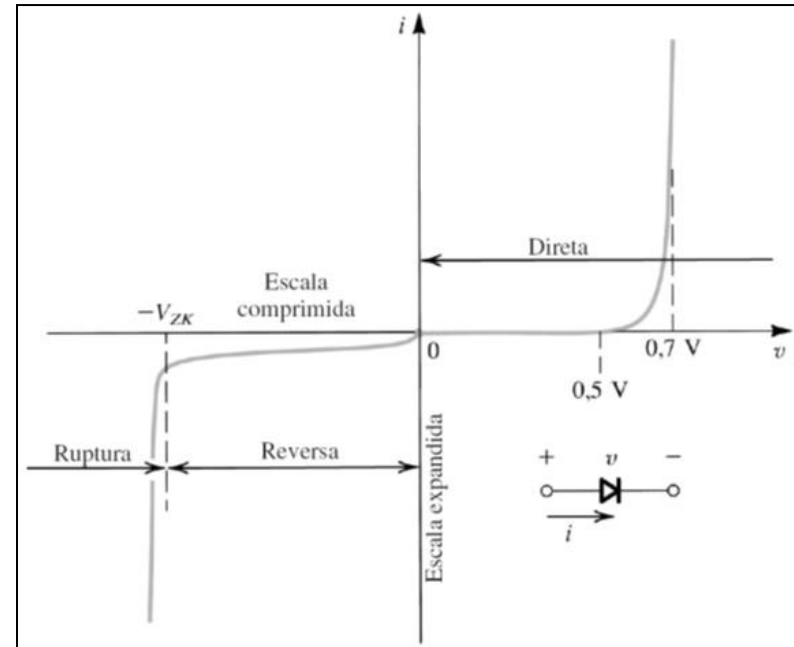
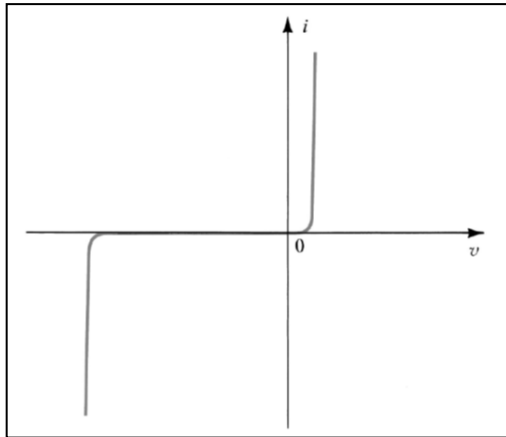


GaAs typically has maximum B_V levels that exceed those of Si of the same power level by about 10%. Both have $50V < B_V < 1KV$.

There are Si power diodes with breakdown voltages as high as 20KV.

Ge typically has breakdown voltage of less than 100V with maximum around 400V.

Características Corrente – Tensão (Influência da Temperatura)



Temperature dependence of the diode forward characteristic.

At a constant current, the voltage drop **decreases** by approximately **2 mV** for **every 1°C increase in temperature**!

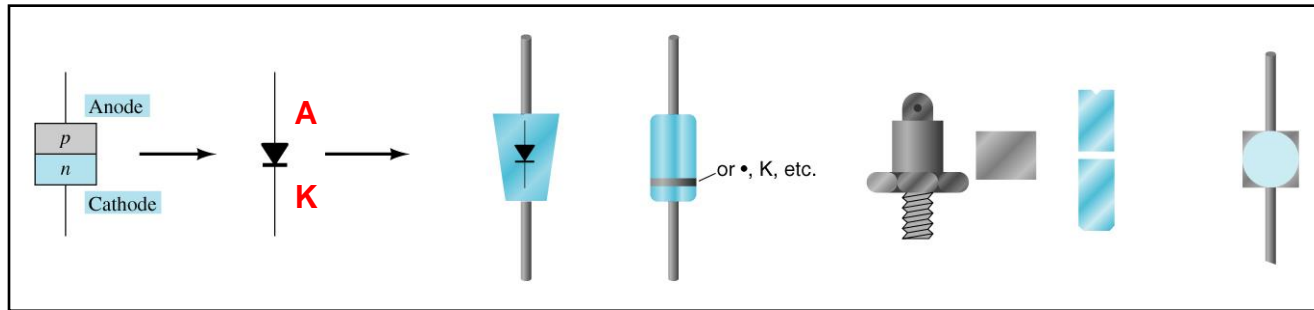
Características Tensão - Corrente

$$i_D = I_S (e^{v_D/nV_T} - 1) \quad (\text{se } i_D \gg I_S) \quad \rightarrow$$

$$v_D = nV_T \ln\left(\frac{i_D}{I_S} + 1\right)$$

$$v_D \cong nV_T \ln(i_D/I_S)$$

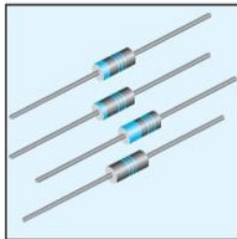
Diode Symbol and Packaging



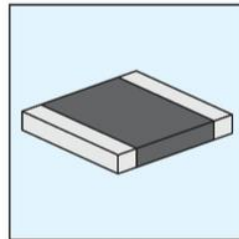
Types of Diodes



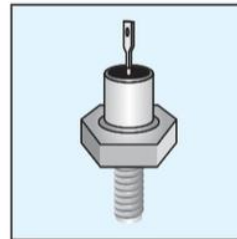
válvula



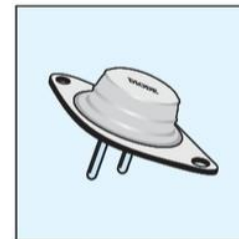
Diodo de uso geral



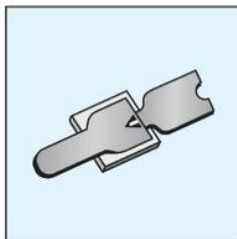
Diodo PIN de alta potência para montagem em superfície



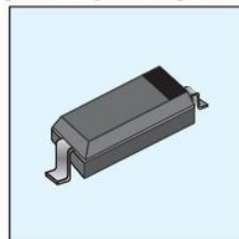
Diodo de potência (com rosca)



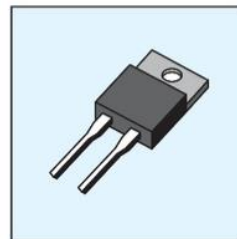
Diodo de potência (com tecnologia planar)



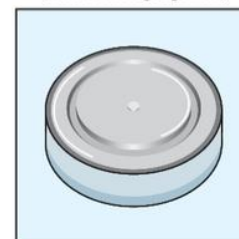
Diodo PIN (beam lead)



Diodo chip para montagem em superfície



Diodo de potência



Diodo de potência (tipo disco)



LED



diodo de sinal
($f > 100\text{MHz}$ | $\sim 100\text{mA}$)
invólucro de vidro



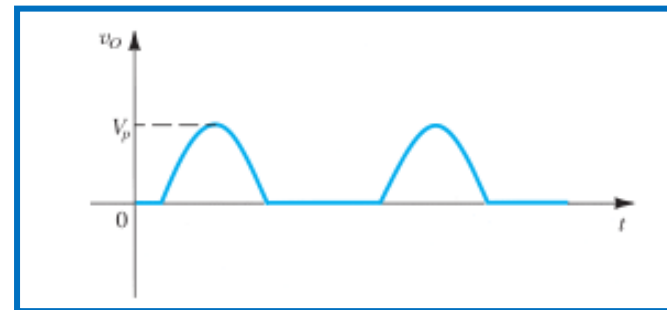
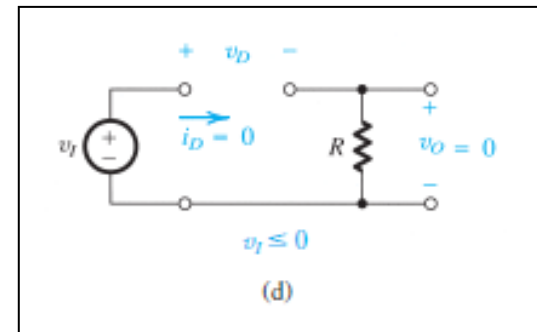
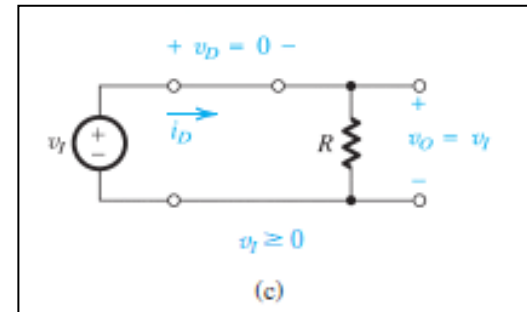
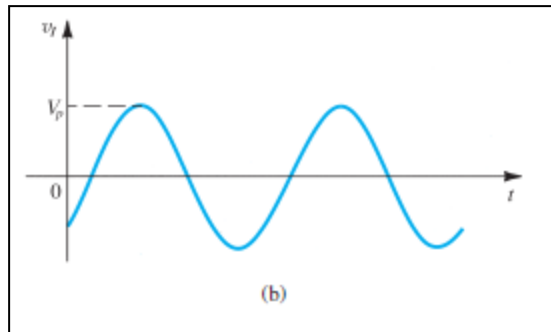
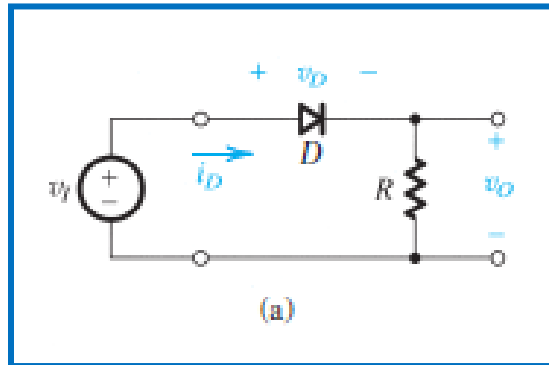
diodo retificador (60Hz)
($f < 500\text{kHz}$ | 1 - 10A)
invólucro de plástico

Diode

Applying the Ideal Model and Applications

Rectifier Circuits

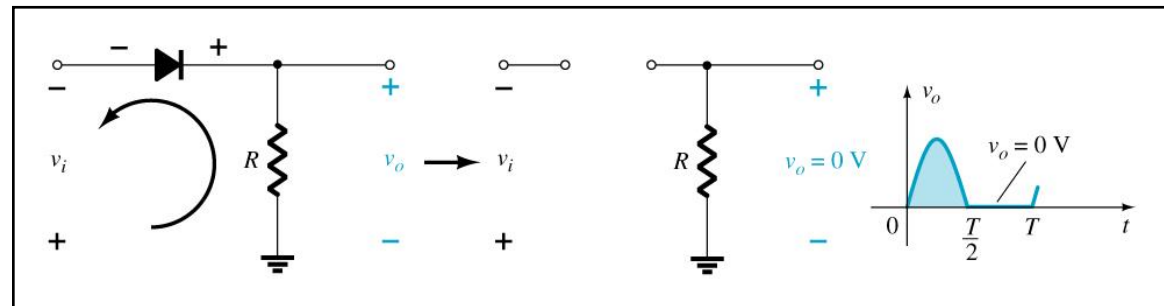
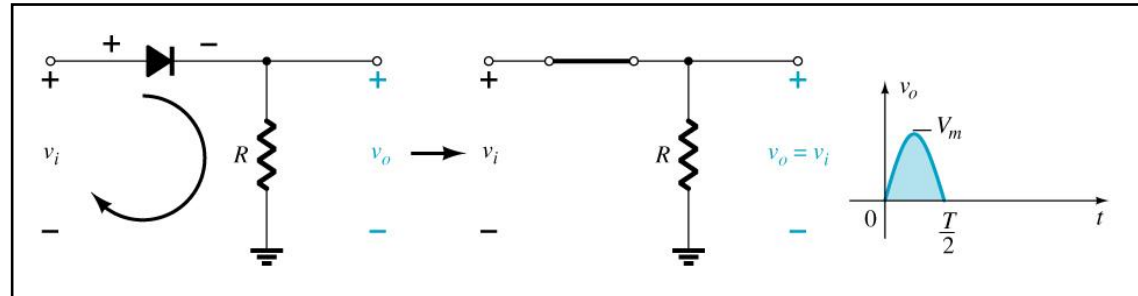
Retificador de 1/2 onda



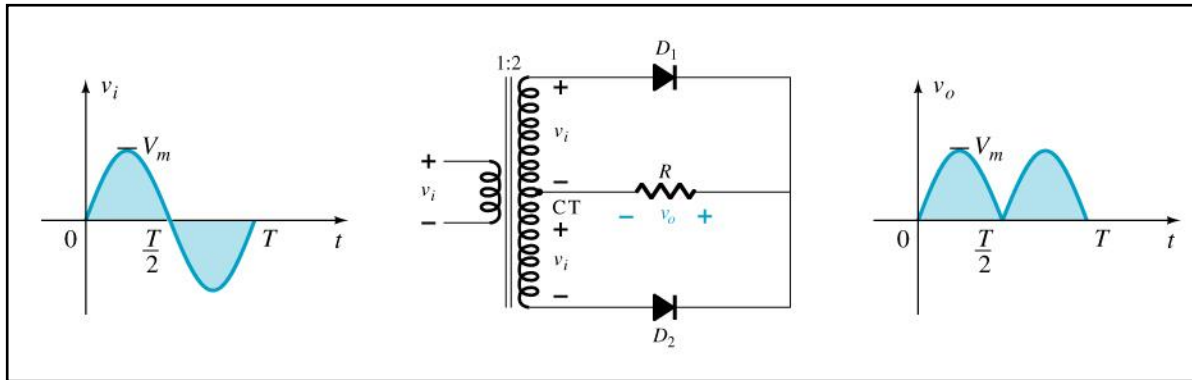
Half-Wave Rectification

The diode conducts only when it is forward biased, therefore only half of the AC cycle passes through the diode to the output.

$$V_{dc} = 0.318V_m$$

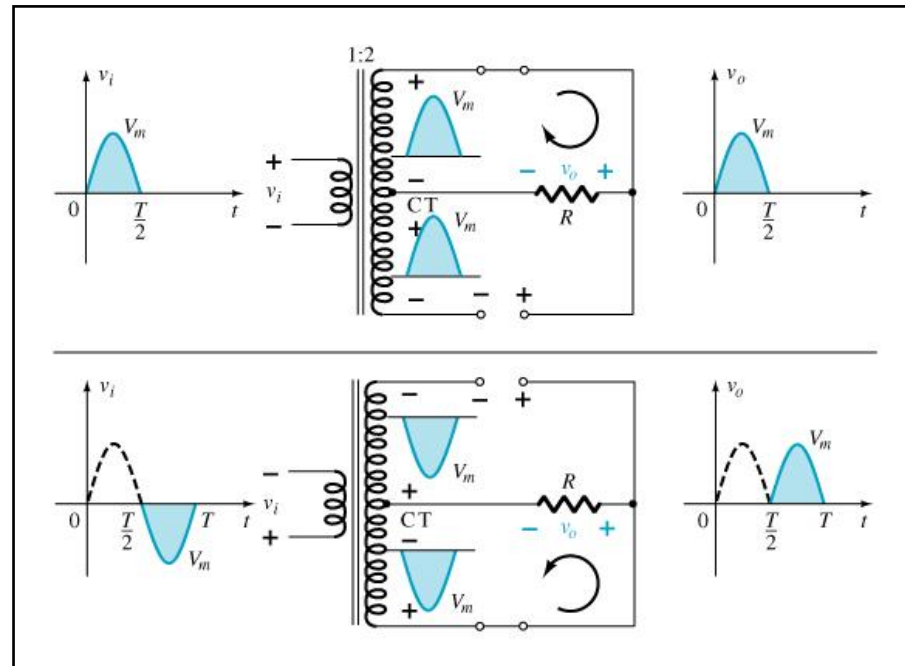


Center-Tapped Rectification

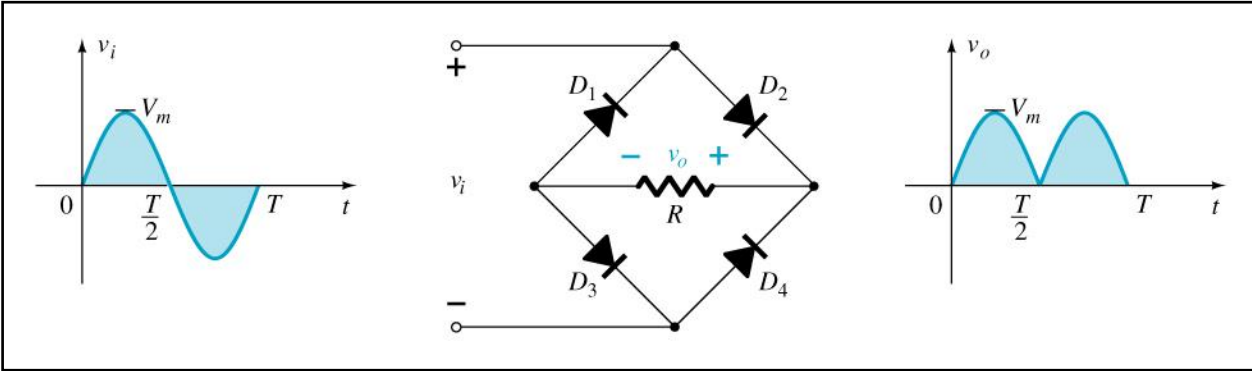


Requires two diodes and a center-tapped transformer.

$$V_{DC} = 0.636 V_m$$



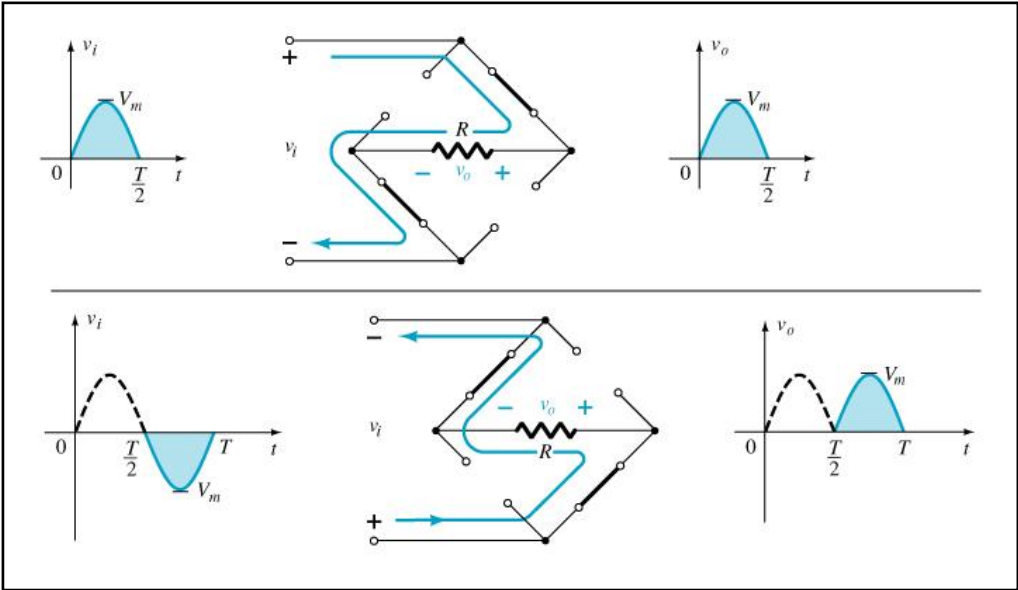
Full-Wave Rectification



Bridge Rectifier

A full-wave rectifier with four diodes that are connected in a bridge configuration.

$V_{DC} = 0.636 V_m$



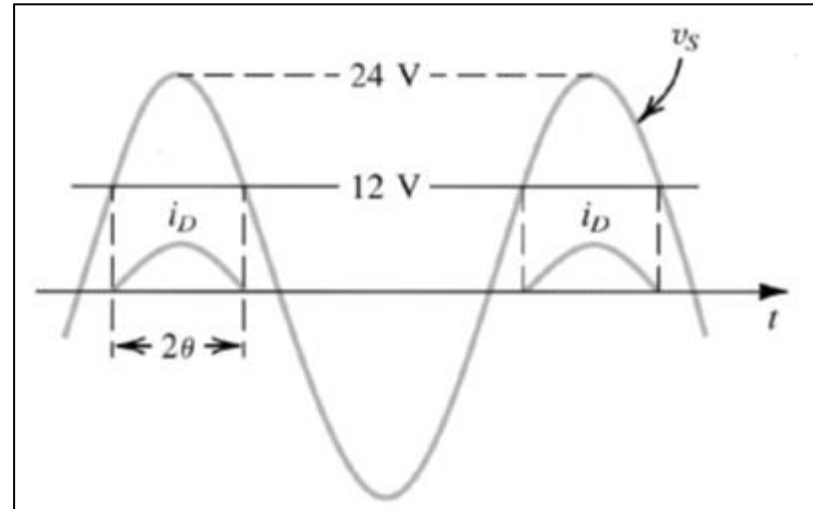
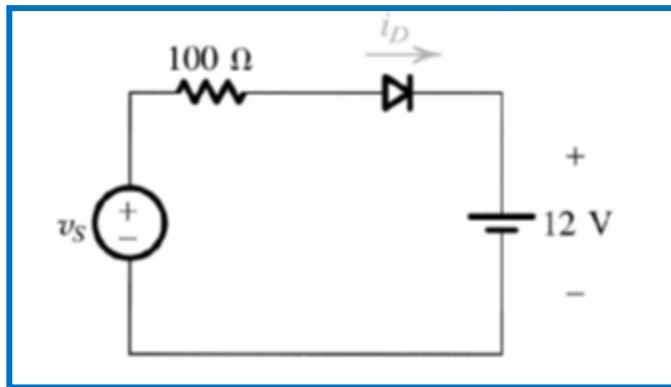
Summary of Rectifier Circuits

Rectifier	Ideal V_{DC}	Realistic V_{DC}
Half Wave	$V_{DC} = 0.318 V_m$	$V_{DC} = 0.318 V_m - 0.7$
Bridge	$V_{DC} = 0.636 V_m$	$V_{DC} = 0.636 V_m - 2(0.7 \text{ V})$
Center-Tapped Transformer	$V_{DC} = 0.636 V_m$	$V_{DC} = 0.636 V_m - 0.7 \text{ V}$

V_m = the peak AC voltage

Battery Charger

Carregador de Bateria

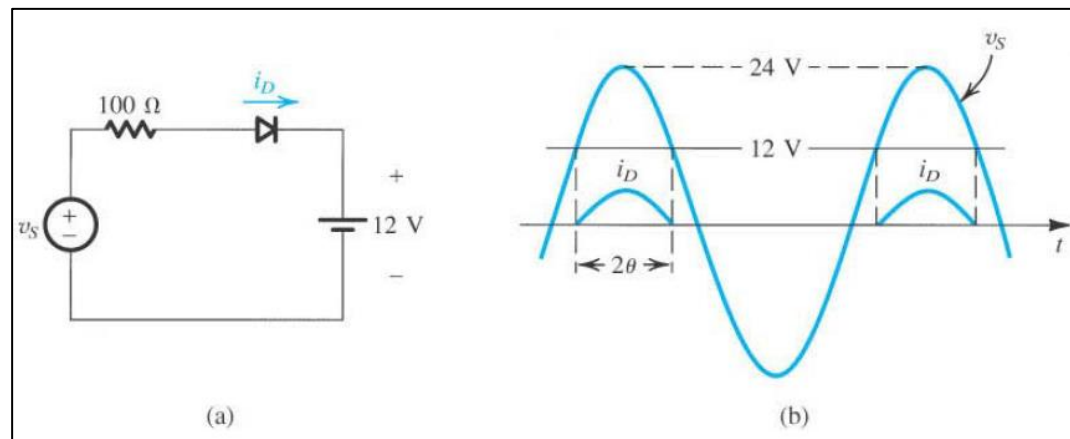


Exercício 3.1

Capítulo 3 - (Sedra A, Smith KC, Microeletrônica, 5ª edição, 2007)

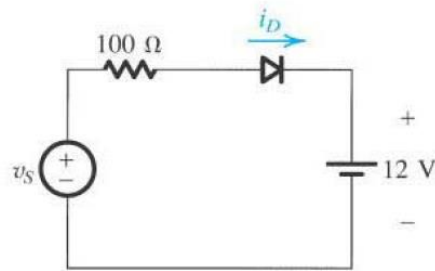
A Figura 3.4(a) mostra um circuito de carga de bateria de 12 V. Se a amplitude de v_S , senoidal, for de 24V de pico, determine:

- a fração de tempo de cada ciclo durante o qual o diodo conduz.
- o valor de pico da corrente no diodo e a tensão de polarização reversa máxima que aparece sobre o diodo.

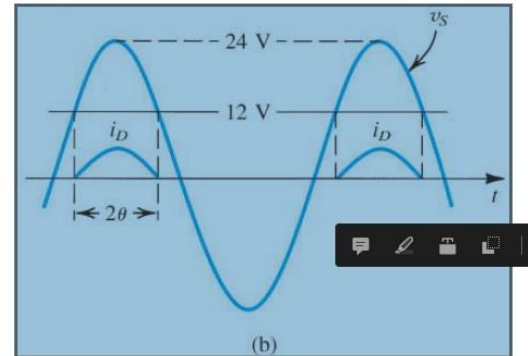


1

O diodo conduz quando v_S excede o valor de 12 V, conforme mostra a Figura 3.4(b). O ângulo de condução é de 2θ , onde θ é dado por:



$$24 \cos \theta = 12$$



2

Portanto, $\theta = 60^\circ$ e o ângulo de condução é de 120° ou um terço de um ciclo. O valor de pico da corrente no diodo é dado por:

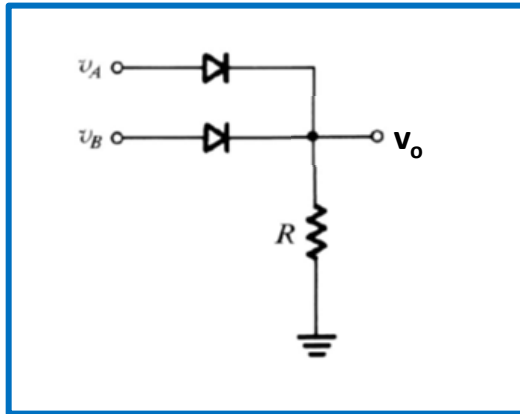
$$I_d = \frac{24 - 12}{100} = 0,12 \text{ A}$$

3

A tensão reversa máxima sobre o diodo ocorre quando v_S está no seu **pico negativo** e é igual a $24 + 12 = 36 \text{ V}$.

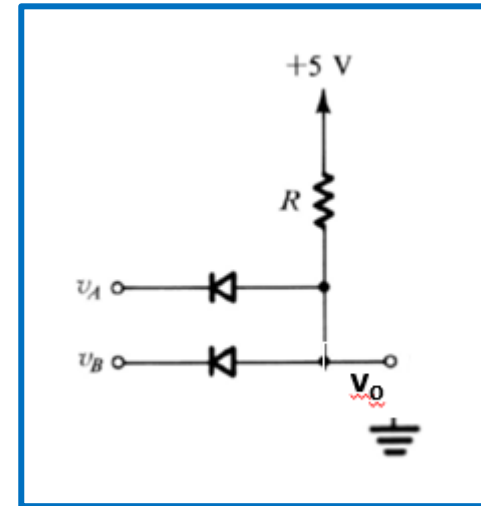
Logical Ports

Porta OR



v_A (V)	v_B (V)	v_O (V)
0	0	0 (baixo)
0	5	1 (~4,3V)
5	0	1 (~4,3V)
5	5	1 (~4,3V)

Porta AND



v_A (V)	v_B (V)	v_O (V)
0	0	0 (0,7 V)
0	5	0 (0,7 V)
5	0	0 (0,7 V)
5	5	1 (<5V)

PSI3321 - Eletrônica I

Aulas Digitais (PoliAberta)




USP

Departamento de Engenharia de
Sistemas Eletrônicos
Escola Politécnica da USP

fundo patrimonial
amigosdapoli

Aula05: Exercícios 1 (35')

- Aplicando o Modelo Ideal em Circuitos
- Ex.3.1: Retif. analisado c/Diodo Ideal
- Exercício 3.2
- Exemplo 3.1
- Portas Lógicas com Diodos
- Exemplo 3.2



CAPÍTULO 3

Aula 5 Exercícios 3.1, 3.2 e Exemplos 3.1 e 3.2
Diodo Ideal, características do Diodo Real e equação de corrente do Diodo (Cap3, 89-96)

PSI3321

4

Aula Sínc

P1 (13')

5

E1 (35')

6

Teste da Aula

Slides da Aula

Fórum da Aula

Ativ. da Aula

Listas Exerc.

Créditos

Capítulo 3

(Sedra A, Smith KC, Microeletrônica, 5ª edição, 2007)

Diode Resistance

Semiconductors react differently to DC and AC currents !

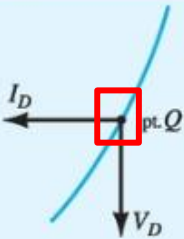
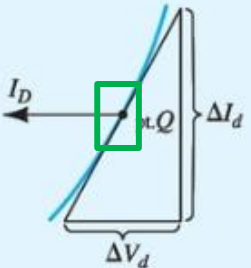
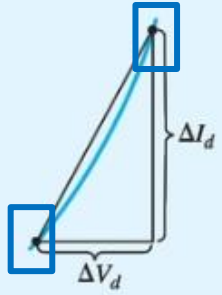
There are three types of resistance:

DC (static) resistance

AC (dynamic) resistance

Average AC resistance

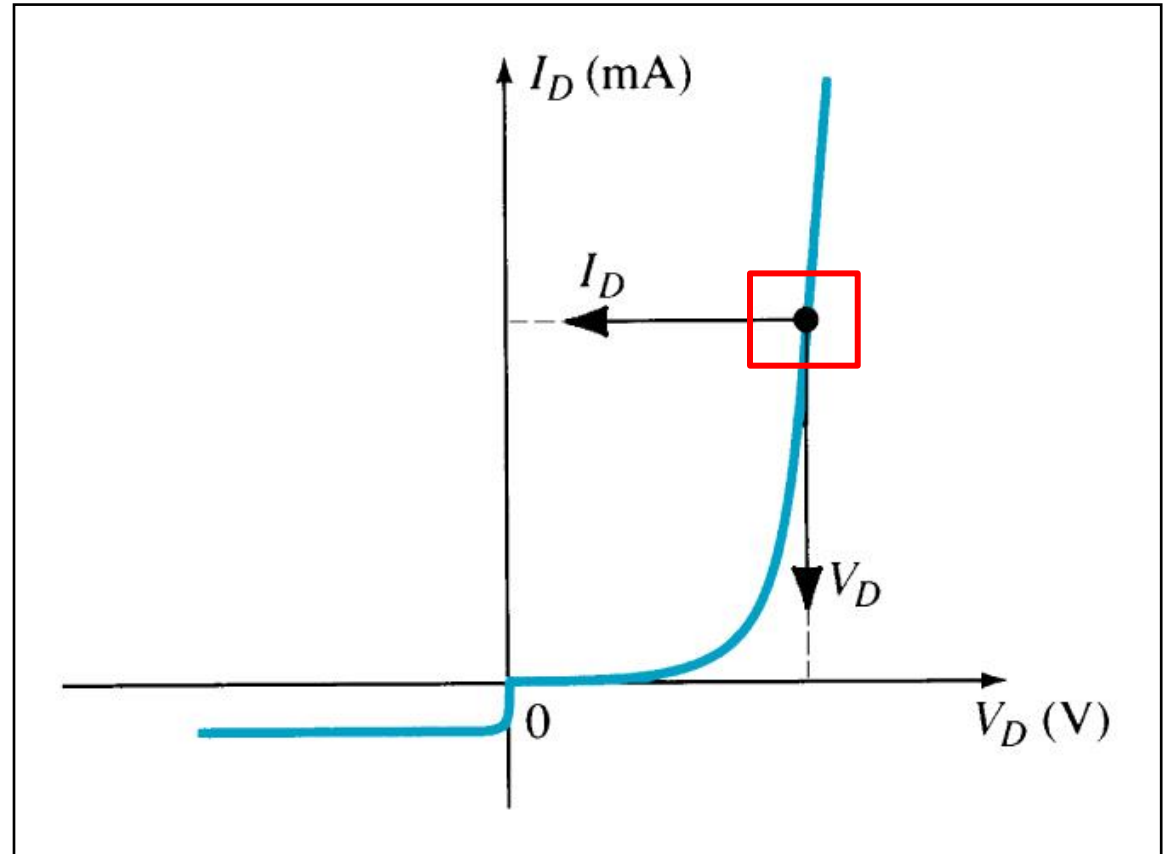
Resistance

Tipo	Equação	Características especiais	Representação gráfica
CC ou estática	$R_D = \frac{V_D}{I_D}$	Definida como um ponto na curva característica	
CA ou dinâmica	$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$	Definida por uma linha tangente no ponto Q	
CA média	$r_{av} = \left. \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \right _{\text{pt. a pt.}}$	Definida por uma linha reta entre os limites de operação	

DC (Static) Resistance

For a specific applied DC voltage (V_D) the diode has a specific current (I_D) and a specific resistance (R_D).

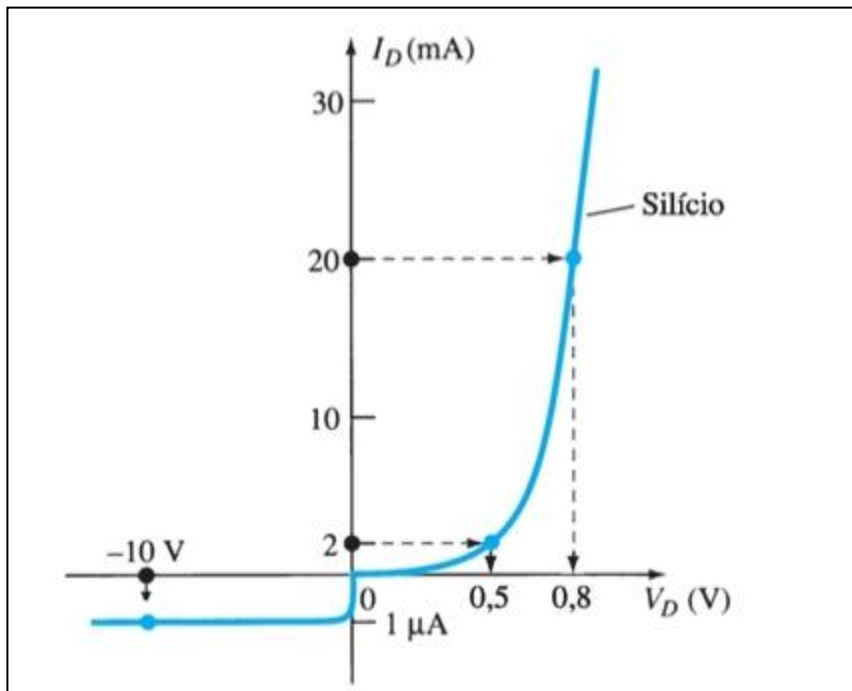
$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$



Exemplo

Determine os níveis de resistência CC do diodo da Figura 1.24 em

- $I_D = 2 \text{ mA}$ (nível baixo)
- $I_D = 20 \text{ mA}$ (nível alto)
- $V_D = -10 \text{ V}$ (polarização reversa)



- Em $I_D = 2 \text{ mA}$, $V_D = 0,5 \text{ V}$ (da curva) e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0,5 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = \mathbf{250 \Omega}$$

- Em $I_D = 20 \text{ mA}$, $V_D = 0,8 \text{ V}$ (da curva) e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0,8 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = \mathbf{40 \Omega}$$

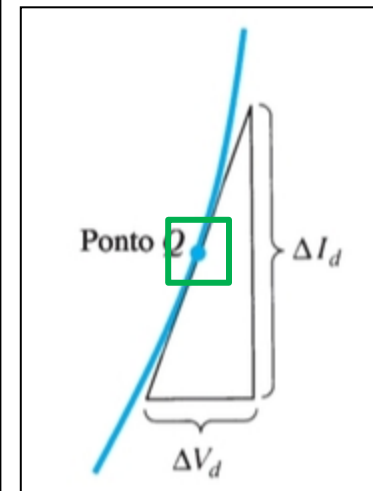
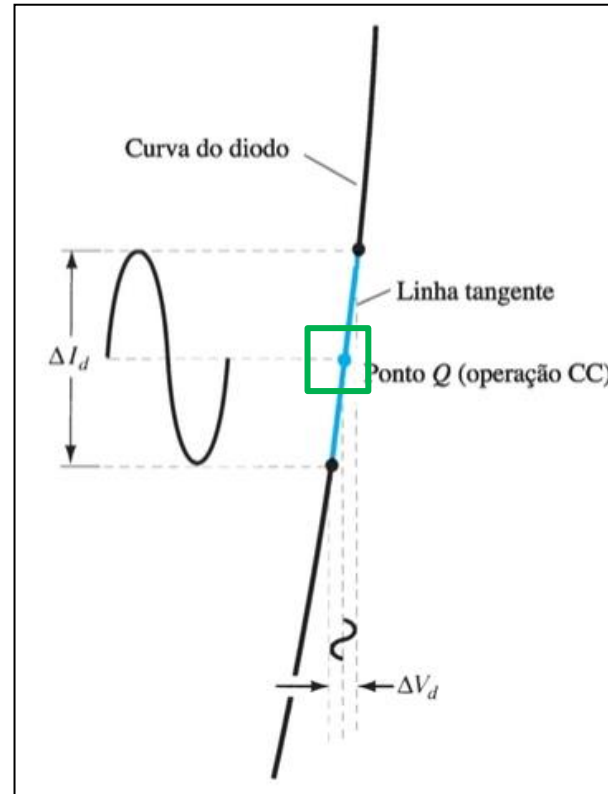
- Em $V_D = -10 \text{ V}$, $I_D = -I_S = -1 \mu\text{A}$ (da curva) e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{10 \text{ V}}{1 \mu\text{A}} = \mathbf{10 \text{ M}\Omega}$$

AC (Dynamic) Resistance

A straight line drawn tangent to the curve through the Q-point will define a particular change in voltage and current that can be used to determine the ac or dynamic resistance for this section of the diode characteristic.

An effort should be made to keep the change in voltage and current as small as possible and equidistant to either side of the Q-point.



Exemplo

Para a curva característica da Figura 1.27:

- Determine a resistência CA em $I_D = 2$ mA.
- Determine a resistência CA em $I_D = 25$ mA.
- Compare os resultados das partes (a) e (b) para as resistências CC em cada nível de corrente.

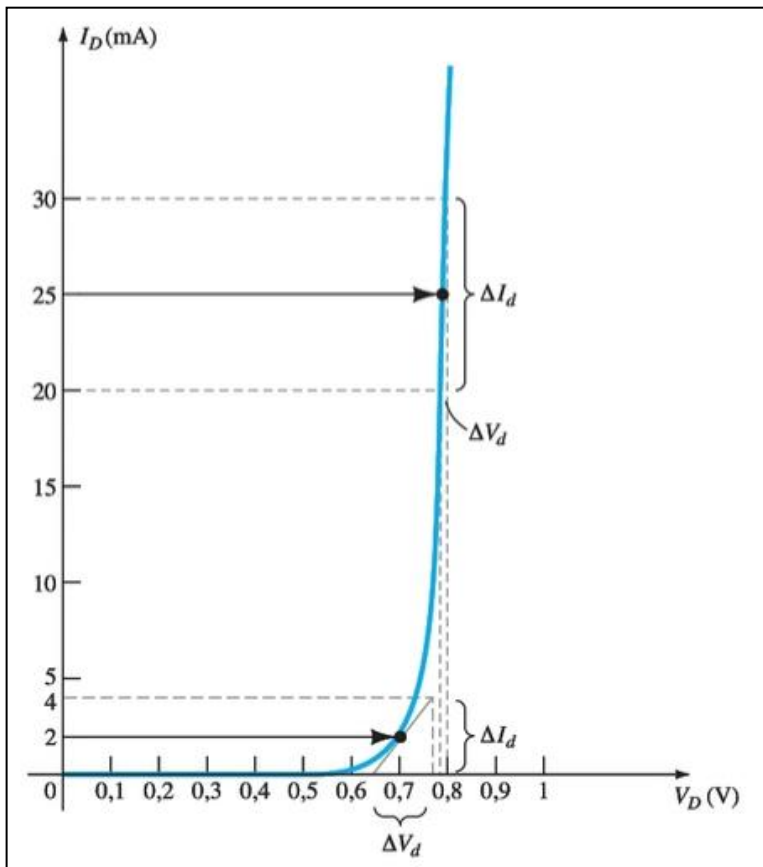


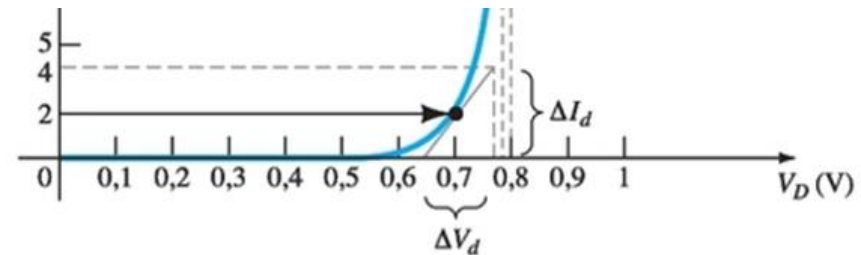
Fig. 1.27

- Para $I_D = 2$ mA, a linha tangente em $I_D = 2$ mA foi traçada como mostrado na Figura 1.27 e foi escolhida uma amplitude de 2 mA acima e abaixo da corrente do diodo especificada. Em $I_D = 4$ mA, $V_D = 0,76$ V; em $I_D = 0$ mA, $V_D = 0,65$ V. As variações resultantes em corrente e tensão são, respectivamente,

$$\Delta I_d = 4 \text{ mA} - 0 \text{ mA} = 4 \text{ mA}$$

e

$$\Delta V_d = 0,76 \text{ V} - 0,65 \text{ V} = 0,11 \text{ V}$$



e a resistência CA é

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0,11 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = 27,5 \Omega$$

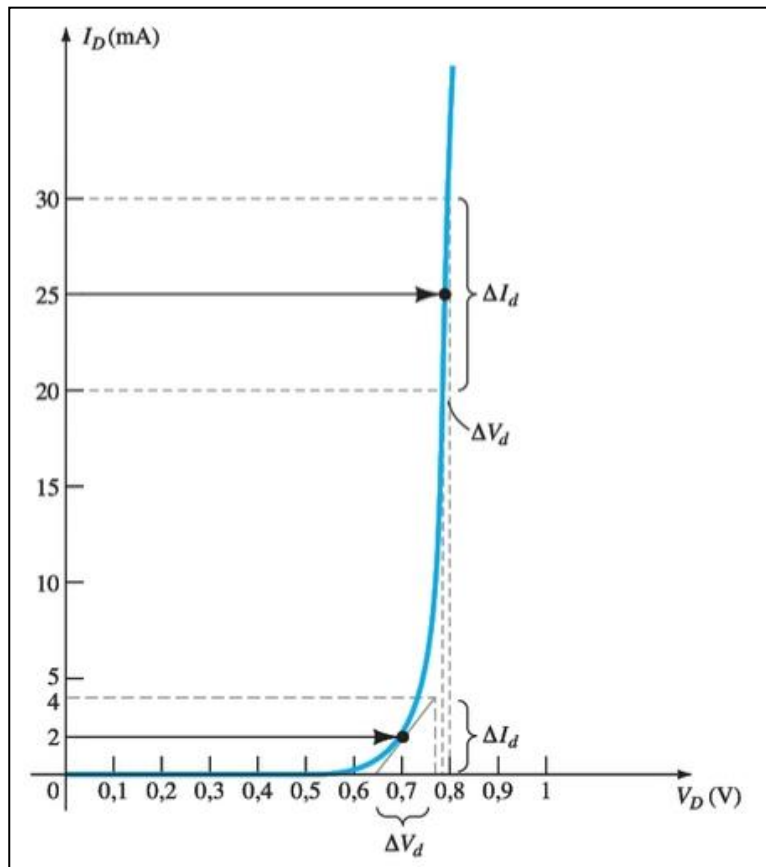


Fig. 1.27

b) Para $I_D = 25$ mA, a linha tangente em $I_D = 25$ mA foi traçada como mostrado na Figura 1.27 e foi escolhida uma amplitude de 5 mA acima e abaixo da corrente de diodo especificada. Em $I_D = 30$ mA, $V_D = 0,8$ V; em $I_D = 20$ mA, $V_D = 0,78$ V. As variações resultantes em corrente e tensão são, respectivamente,

$$\Delta I_d = 30 \text{ mA} - 20 \text{ mA} = 10 \text{ mA}$$

e

$$\Delta V_d = 0,8 \text{ V} - 0,78 \text{ V} = 0,02 \text{ V}$$

e a resistência CA é

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0,02 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 2 \Omega$$

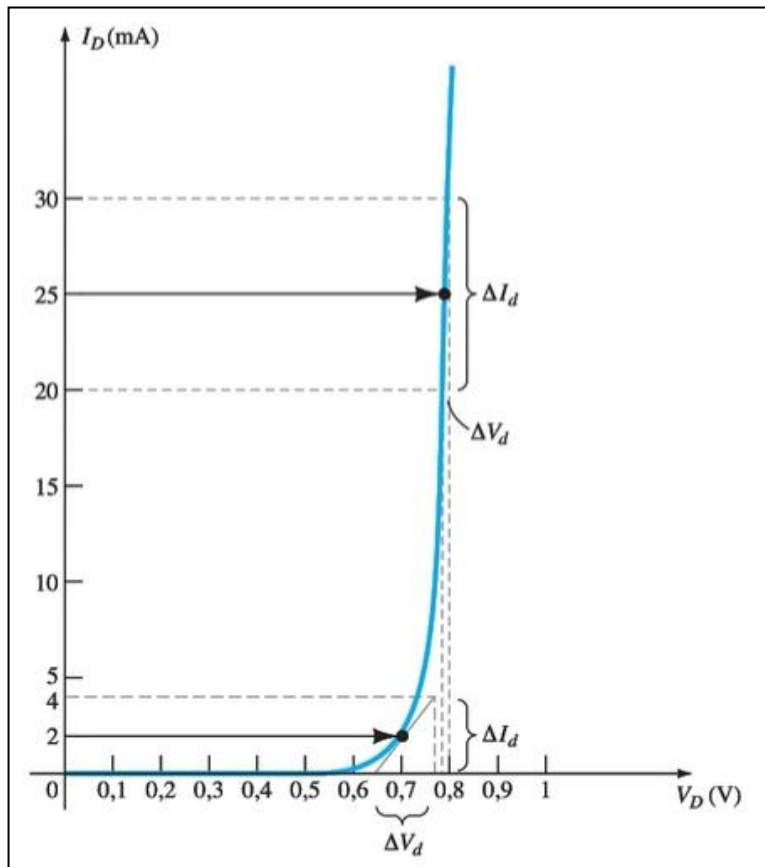


Fig. 1.27

c) Compare os resultados das partes (a) e (b) para as resistências CC em cada nível de corrente.

Para $I_D = 2$ mA, $V_D = 0,7$ V e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0,7 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 350 \Omega$$

o que excede em muito o r_d de 27,5 Ω .

Para $I_D = 25$ mA, $V_D = 0,79$ V e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0,79 \text{ V}}{25 \text{ mA}} = 31,62 \Omega$$

o que excede em muito o r_d de 2 Ω .

AC (Dynamic) Resistance (calculation)

1

$$I_D = I_s(e^{V_D/nV_T} - 1) \quad (\text{A})$$

$$V_T = \frac{kT_K}{q} \quad (\text{V})$$

k é a constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K
 T_K é a temperatura absoluta em Kelvin = 273 + temperatura em °C
 q é a magnitude da carga eletrônica = $1,6 \times 10^{-19}$ C

$$\frac{d}{dV_D}(I_D) = \frac{d}{dV_D}[I_s(e^{V_D/nV_T} - 1)] \rightarrow \frac{dI_D}{dV_D} = \frac{1}{nV_T}(I_D + I_s) \xrightarrow{I_D \gg I_s} \frac{dI_D}{dV_D} \cong \frac{I_D}{nV_T}$$

$$\rightarrow \frac{dI_D}{dV_D} \cong \frac{I_D}{nV_T} \rightarrow \frac{dV_D}{dI_D} = r_d = \frac{nV_T}{I_D} \rightarrow r_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$$

$n = 1$ e $V_T \cong 26 \text{ mV}$

$$r_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$$

(due to pn junction)



$$r'_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D} + r_B \quad \text{ohms}$$

r_B is the resistance of the semiconductor material itself (**body resistance**) + the resistance introduced by the connection between the semiconductor material and the external metallic conductor (**contact resistance**)

2

There is no need to worry about sketching tangente lines as defined for AC resistance. It is important to keep in mind, however, that the **equation of r_d** is accurate only for values of I_D in the vertical-rise section of the curve.

For lesser values of I_D , the value of r_d obtained must be multiplied by a fator of 2 (Si). For small values of I_D below the knee of the curve, the equation of r_d becomes inappropriate.

Exemplo 1

In the example saw the ac resistance at 25 mA was calculated to be 2Ω . Using the r_d equation:

$$r_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D} = \frac{26 \text{ mV}}{25 \text{ mA}} = \mathbf{1,04 \Omega}$$

The difference of about 1Ω could be treated as the contribution of r_B .

Exemplo 2

In the example saw the ac resistance at 2 mA was calculated to be 27.5Ω . Using the r_d equation but multiplying by a factor of 2 for this region (knee):

$$r_d = 2\left(\frac{26 \text{ mV}}{I_D}\right) = 2\left(\frac{26 \text{ mV}}{2 \text{ mA}}\right) = 2(13 \Omega) = \mathbf{26 \Omega}$$

The difference of about 1.5Ω could be treated as the contribution of r_B .

3 Forward bias region:

$$r'_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D} + r_B$$

The resistance depends on the amount of current (I_D) in the diode.

The thermal voltage is temperature dependent (26 mV for 25°C).

r_B ranges from a typical 0.1 Ω for high power devices to 2 Ω for low power, general purpose diodes. In some cases r_B can be ignored.

4 Reverse bias region:

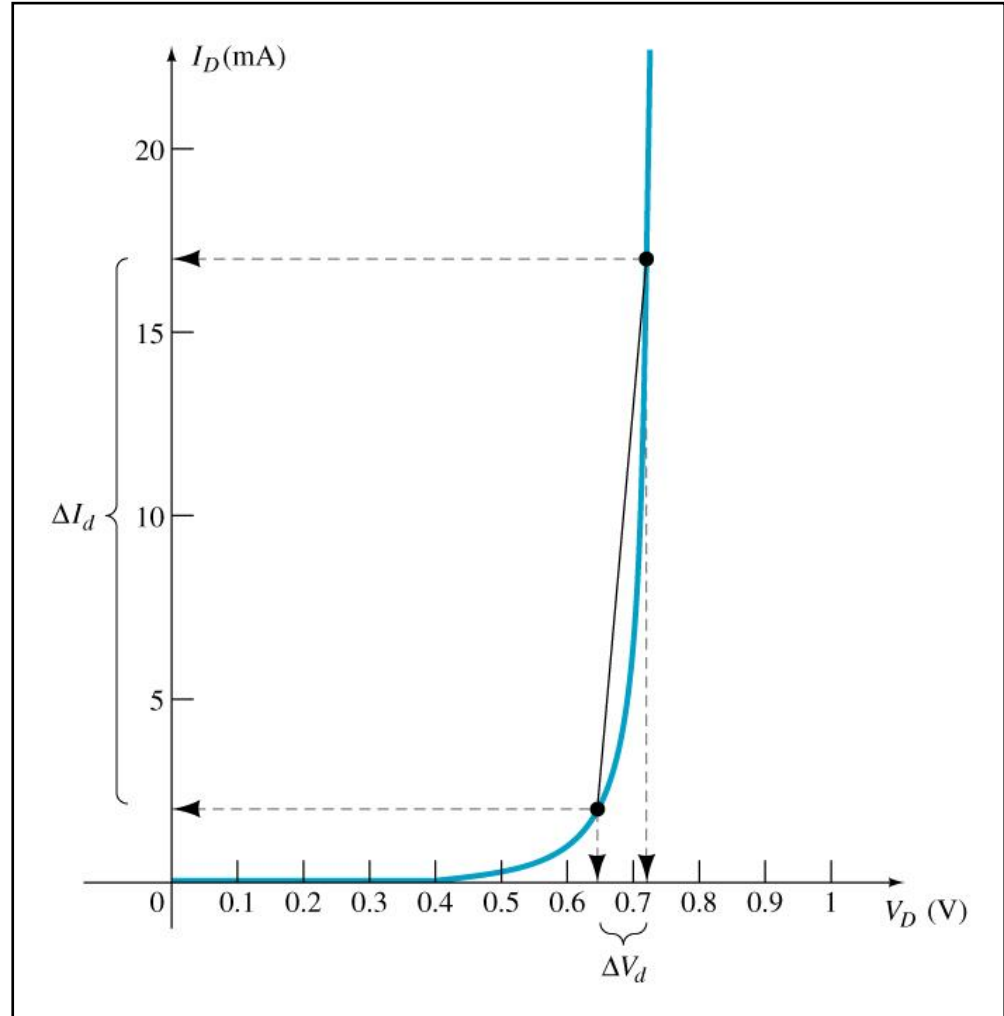
$$r'_d = \infty$$

The resistance is effectively infinite. The diode acts like an open circuit !

Average AC Resistance

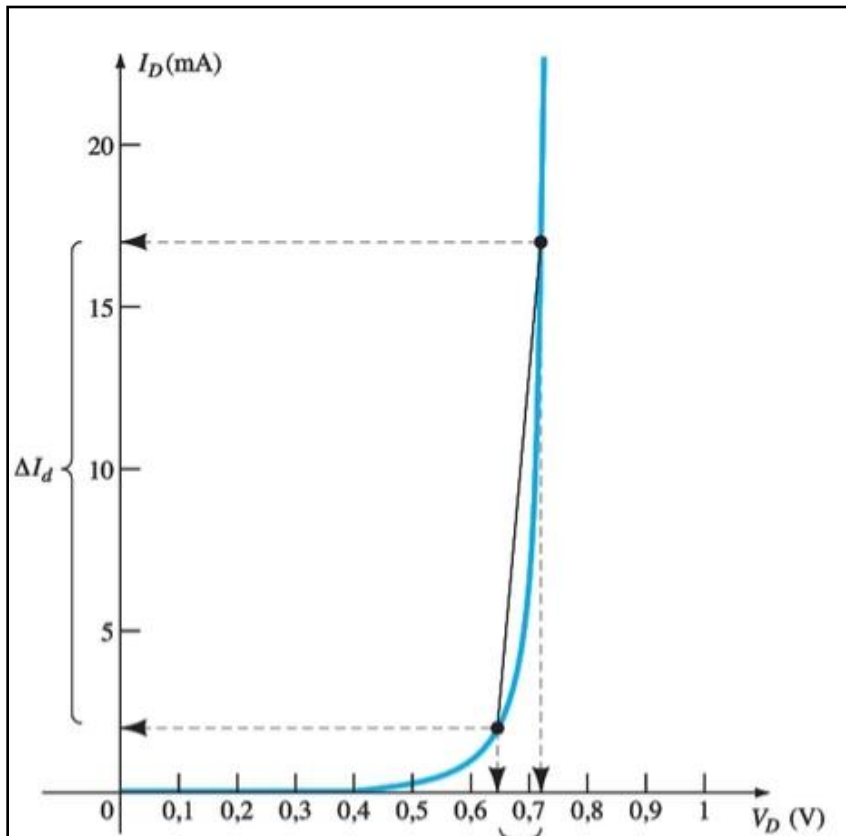
$$r_{av} = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \quad | \quad pt. \text{ to } pt.$$

If the input signal is sufficiently large to produce a broad swing the resistance for this region is called **Average AC resistance**.



Exemplo:

For the situation shown in the curve below calculate r_{av} .



$$\Delta I_d = 17 \text{ mA} - 2 \text{ mA} = 15 \text{ mA}$$

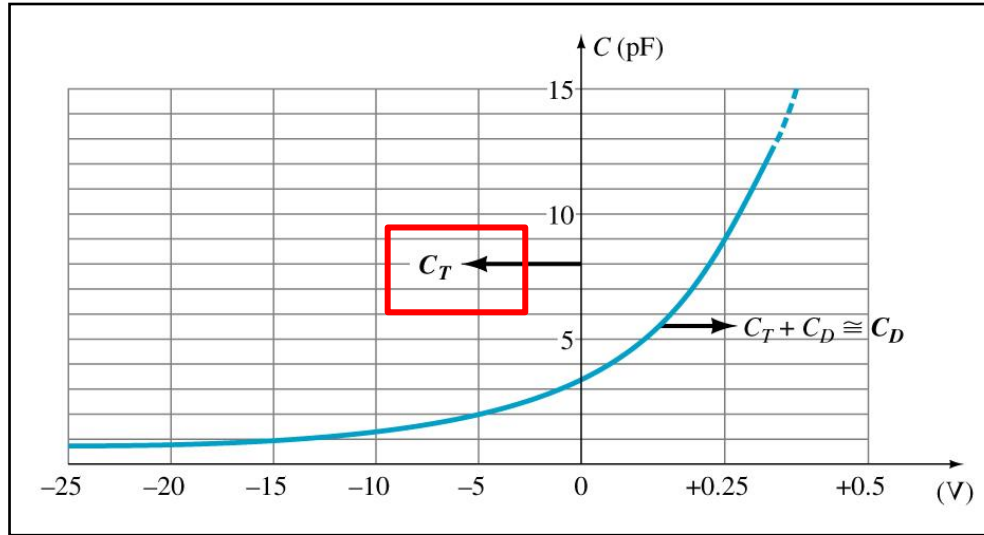
$$e \quad \Delta V_d = 0,725 \text{ V} - 0,65 \text{ V} = 0,075 \text{ V}$$

$$\text{com} \quad r_{av} = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0,075 \text{ V}}{15 \text{ mA}} = 5 \Omega$$

If the AC resistance (r_d) were calculated at $I_D = 2 \text{ mA}$ its value would be more than 5Ω and if calculated at 17 mA it would be less. The between, the AC resistance would make the transition from the high value at 2 mA to the lower value at 17 mA .

The r_{av} defines a value that is considered the average of the ac values from 2 mA to 17 mA .

Diode Capacitance (Reverse Bias)



When **reverse biased** the depletion layer is very large and the diode's strong positive and negative polarities create capacitance (C_T , **transition capacitance**). The amount of capacitance depends on the reverse voltage applied.

$$C_T = \frac{C(0)}{(1 + |V_R/V_K|)^n}$$

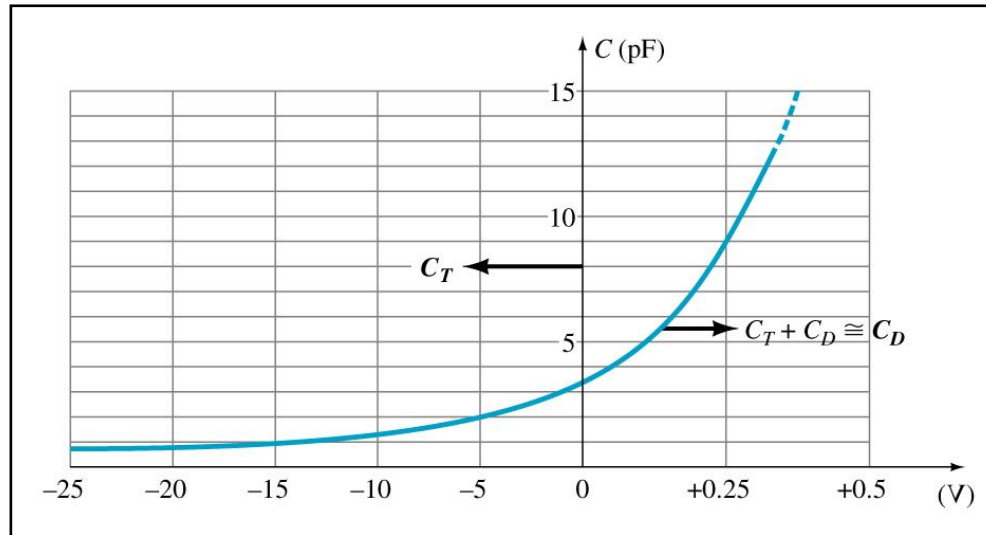
$C(0)$ - capacitance under no-bias conditions.

V_R - applied reverse bias potential

V_K - junction potential with no bias

n - is 1/2 or 1/3 depending on the manufacturing process.

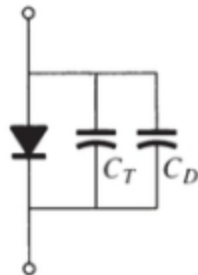
Diode Capacitance (Forward Bias)



When **forward biased** storage capacitance or diffusion capacitance (C_D) exists as the diode voltage increases.

$$C_D = \left(\frac{\tau_r}{V_K} \right) I_D$$

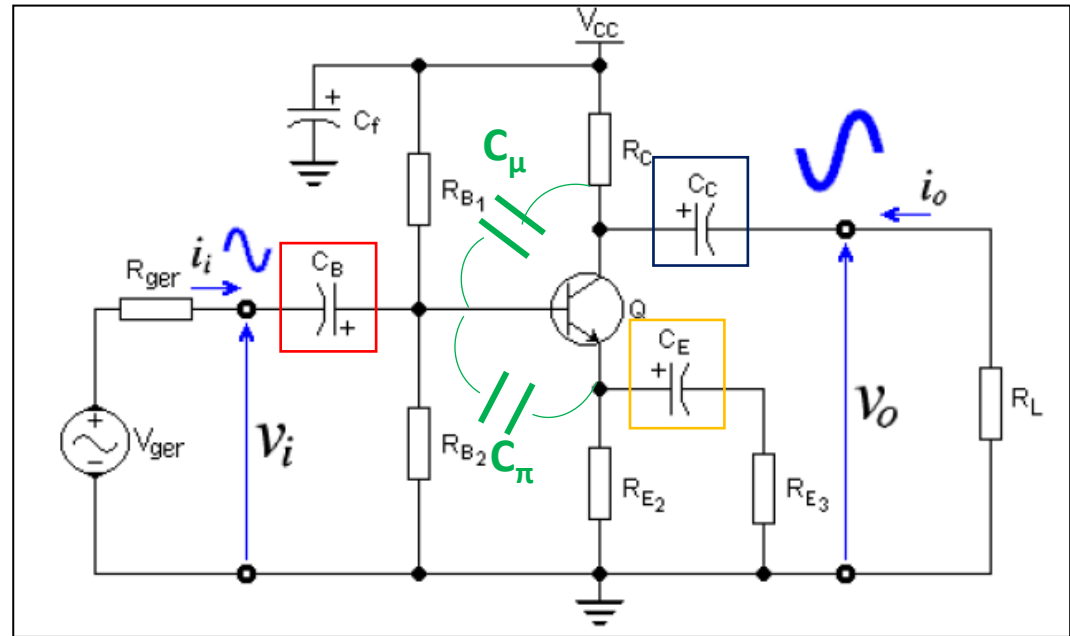
τ_r is the minority carrier life time. For example, the time for a minority carrier such as a hole to recombine with an electron in the n-type material



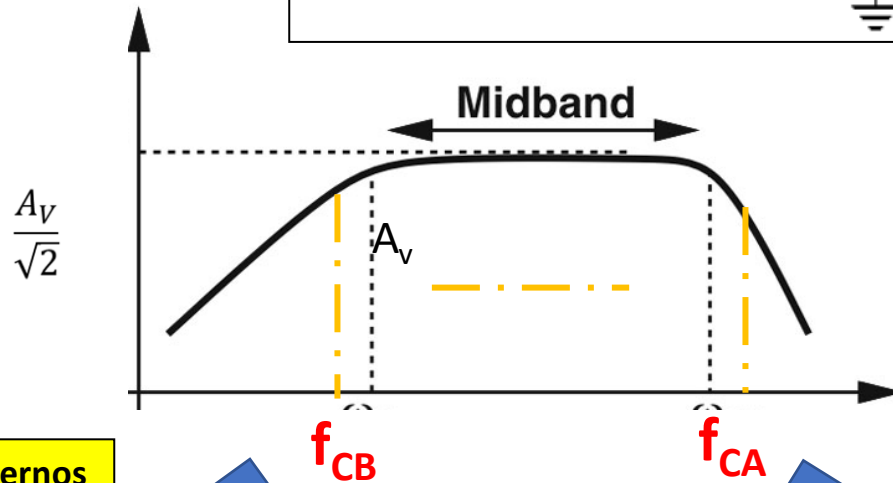
For low or mid-frequency applications (except in the power area) the capacitor is normally not included in the diode symbol.

Importância de C_T e C_T

Amplificador Emissor Comum



Resposta em Frequência



os capacitores externos C_B , C_C , C_E influenciam a resposta em baixa frequência !

os capacitores internos (C_{π} , C_{μ} , trilhas de protoboard) influenciam a resposta em alta frequência !!

Diode Testing

Diodes are commonly tested using one of these types of equipment:

Diode checker

Ohmmeter

Curve tracer

Diode Checker

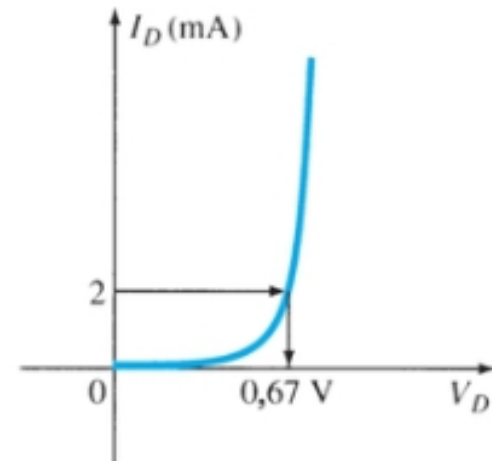
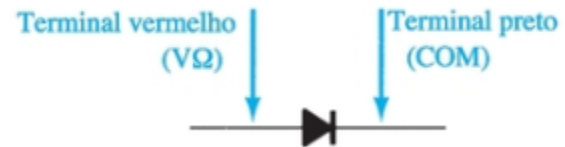
Many digital multimeters have a diode checking function.
The diode should be tested out of circuit.

A normal diode exhibits its forward voltage !

Gallium arsenide $\cong 1.2$ V

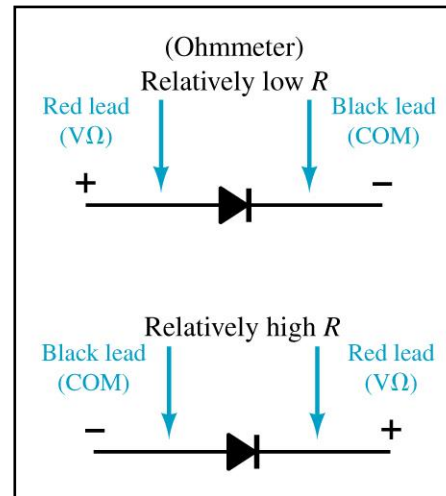
Silicon diode $\cong 0.7$ V

Germanium diode $\cong 0.3$ V

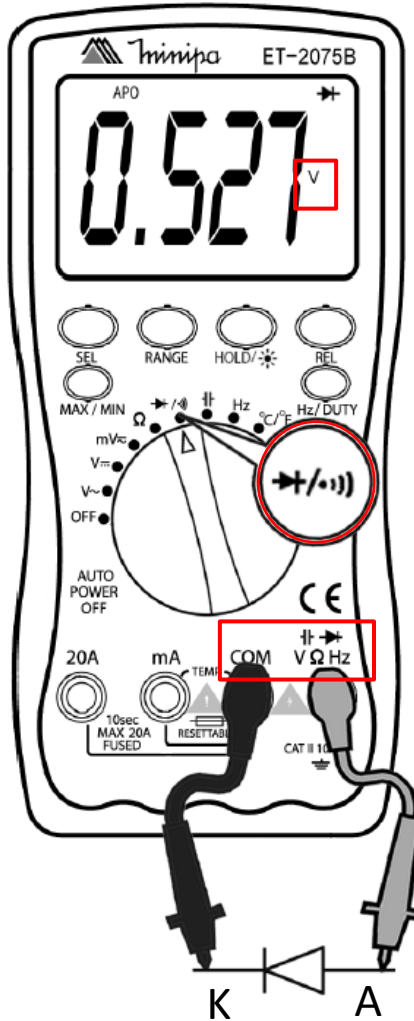


Ohmmeter

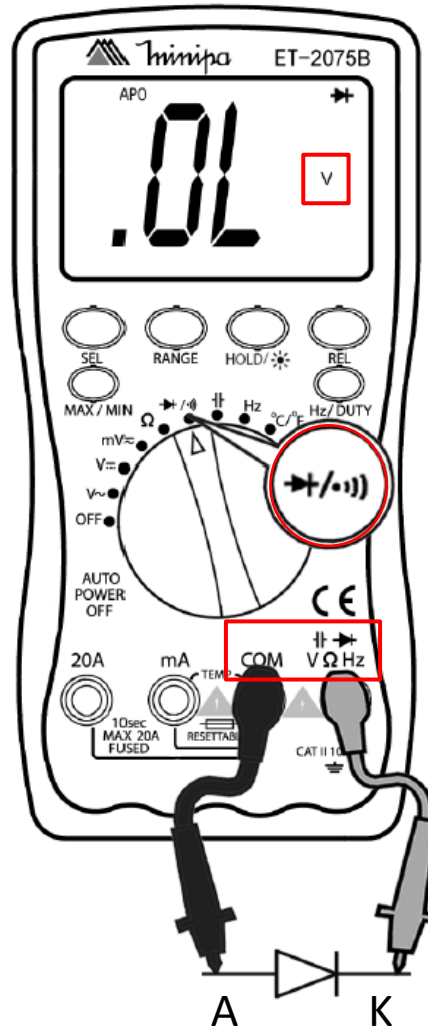
An ohmmeter set on a low Ohms scale can be used to test a diode. The diode should be tested out of circuit.



Ohmmeter



Diodo Diretamente Polarizado
(tensão de condução e há corrente)

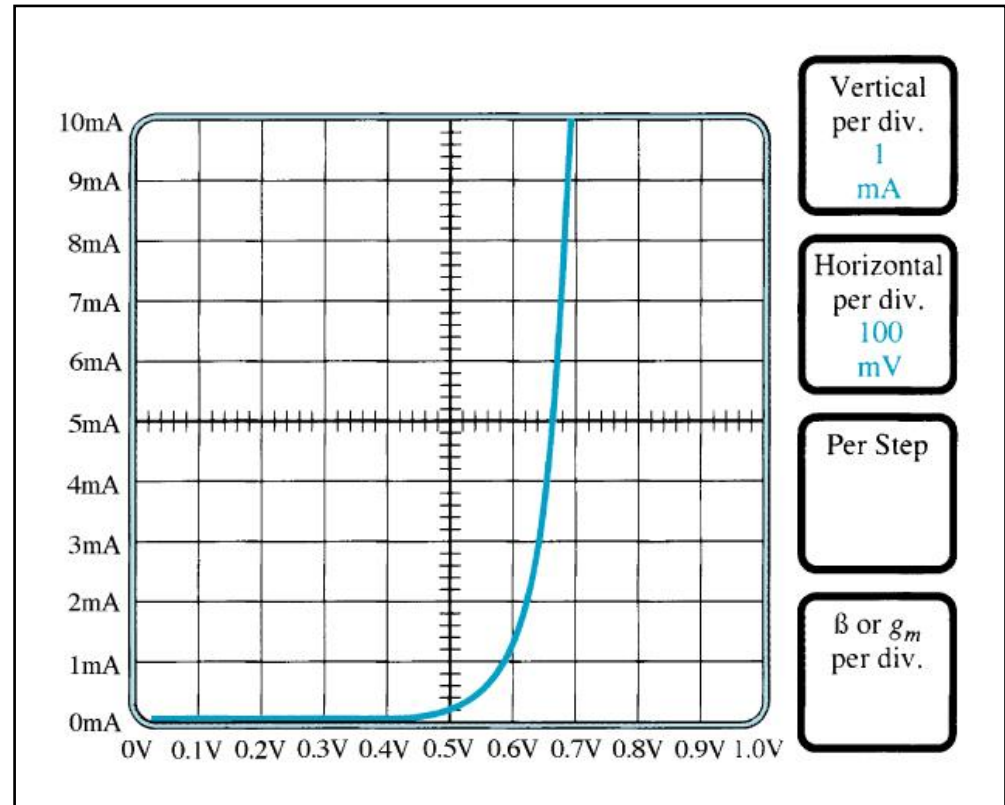
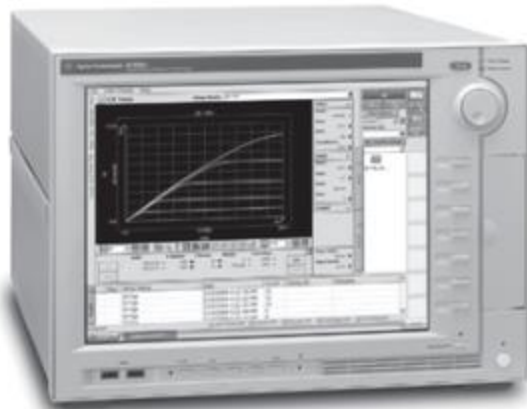


Diodo Reversamente Polarizado
(não há tensão de condução e sem corrente)

Faixa	Descrição	Condição de Teste
▶	O display exibe a queda de tensão aproximada do diodo.	Corrente direta de aprox. 0,5mA, e tensão reversa de aprox. 1,5V
🔊	A buzina toca se a resistência medida for menor que $(30 \pm 20)\Omega$	Tensão de Circuito Aberto de aprox. 0,5V.

Curve Tracer

A curve tracer displays the characteristic curve of a diode in the test circuit. This curve can be compared to the specifications of the diode from a data sheet.



Diode Specification Sheet

Diode data sheets contain standard information, making cross-matching of diodes for replacement or design easier.

1. Forward Voltage (V_F) at a specified current and temperature
2. Maximum forward current (I_F) at a specified temperature
3. Reverse saturation current (I_R) at a specified voltage and temperature
4. Reverse voltage rating, PIV or PRV or $V_{(BR)}$, at a specified temperature
5. Maximum power dissipation at a specified temperature
6. Capacitance levels
7. Reverse recovery time, t_{rr}
8. Operating temperature range

DIODO DE SILÍCIO POR DIFUSÃO COM TECNOLOGIA PLANAR

A • BV ... 125 V (MÍN) @ 100 μ A (BAY73)

ESPECIFICAÇÕES ABSOLUTAS MÁXIMAS (Nota 1)

Temperaturas

Faixa de temperatura de armazenamento	-65° até +200°C
Máxima temperatura de operação da junção	+175°C
Temperatura dos terminais	+260°C

B

Dissipação de potência (Nota 2)

Máxima dissipação de potência total à temperatura ambiente de 25°C	500 mW
Fator linear de redução de potência (de 25°C)	-3,33 mW/°C

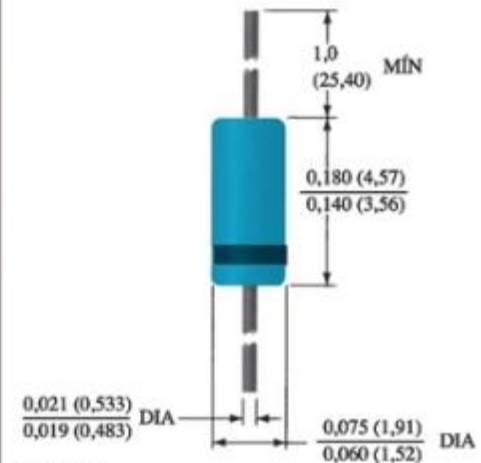
C

Correntes e tensão máximas

WIV	Tensão Reversa de Trabalho BAY73	100 V
I_O	Corrente retificada média	200 mA
I_F	Corrente direta contínua	500 mA
i_f	Corrente direta repetitiva de pico	600 mA
$i_{f(\text{surto})}$	Corrente direta de surto de pico	
	Largura de pulso = 1 s	1,0 A
	Largura de pulso = 1 μ s	4,0 A

D

Encapsulamento DO-35



NOTAS:

- Terminais de aço revestidos com cobre estanhado.
- Terminais revestidos com ouro disponíveis.
- Encapsulamento de vidro hermeticamente fechado.
- O peso do encapsulamento é 0,14 grama.

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (temperatura ambiente de 25 °C, a menos que indicado de outro modo)

	SÍMBOLO	CARACTERÍSTICA	BAY73		UNIDADES	CONDIÇÕES DE TESTE
			MÍN	MÁX		
E	V_F	Tensão direta	0,85	1,00	V	$I_F = 200 \text{ mA}$
			0,81	0,94	V	$I_F = 100 \text{ mA}$
			0,78	0,88	V	$I_F = 50 \text{ mA}$
			0,69	0,80	V	$I_F = 10 \text{ mA}$
			0,67	0,75	V	$I_F = 5,0 \text{ mA}$
			0,60	0,68	V	$I_F = 1,0 \text{ mA}$
F	I_R	Corrente reversa		500	nA	$V_R = 20 \text{ V}, T_A = 125^\circ\text{C}$
				1,0	μA	$V_R = 100 \text{ V}, T_A = 125^\circ\text{C}$
				0,2	nA	$V_R = 20\text{V}, T_A = 25^\circ\text{C}$
				0,5	nA	$V_R = 100\text{V}, T_A = 25^\circ\text{C}$
	BV	Tensão de ruptura	125		V	$I_R = 100 \mu\text{A}$
G	C	Capacitância		5,0	pF	$V_R = 0, f = 1,0 \text{ MHz}$
H	t_r	Tempo de recuperação reversa		3,0	μs	$I_F = 10 \text{ mA}, V_R = 35 \text{ V}$ $R_L = 1,0 \text{ a } 100 \text{ k}\Omega$ $C_L = 10 \text{ pF}, \text{JAN } 256$

Notas:

- Essas especificações são valores limitantes acima dos quais a utilidade do diodo pode ser prejudicada.
- Esses são limites para regime permanente. O fabricante deve ser consultado no caso de aplicações que envolvam pulso ou ciclos de trabalho baixos.

A

A folha de dados realça o fato de que o diodo de alta tensão de silício possui uma tensão de polarização reversa *mínima* de 125 V a uma corrente de polarização reversa específica.

B

Observe a ampla faixa de temperatura de operação. Certifique-se de que as folhas de dados usem normalmente a escala Celsius, sendo que $200\text{ }^{\circ}\text{C} = 392\text{ }^{\circ}\text{F}$ e $-65\text{ }^{\circ}\text{C} = -85\text{ }^{\circ}\text{F}$.

C

O nível máximo de dissipação de potência é dado por $P_D = V_D I_D = 500\text{ mW} = 0,5\text{ W}$. O efeito do fator linear de redução de potência de $3,33\text{ mW}/^{\circ}\text{C}$ é demonstrado na Figura 1.37(a). Quando a temperatura excede $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, a potência máxima nominal cai $3,33\text{ mW}$ para cada aumento de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ na temperatura. A $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, o ponto de ebulição da água, a potência máxima nominal cai à metade de seu valor original. Uma temperatura inicial de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ é normal em um gabinete com equipamento eletrônico funcionando em situação de baixa potência.

D

A máxima corrente direta contínua é 500 mA. O gráfico da Figura 1.37(b) revela que a corrente direta em $0,5\text{ V}$ é de, aproximadamente, $0,01\text{ mA}$, mas salta para 1 mA (100 vezes mais) perto de $0,65\text{ V}$. Em $0,8\text{ V}$, a corrente é superior a 10 mA e, um pouco acima de $0,9\text{ V}$, chega perto de 100 mA . A curva da Figura 1.37(b) certamente não se parece em nada com as curvas características das últimas seções. Isso se deve à utilização de uma escala logarítmica para a corrente. Se uma escala linear fosse usada para a corrente, seria impossível mostrar um intervalo de valores entre $0,01$ a 1.000 mA . Se as divisões verticais estivessem em incrementos de $0,01\text{ mA}$, seriam necessários 100 mil intervalos iguais sobre o eixo vertical para atingir 1.000 mA . Por ora, vamos admitir que o valor da tensão em determinados níveis de corrente possa ser encontrado por meio da interseção com a curva. Para valores verticais acima de um nível como $1,0\text{ mA}$, o próximo nível será 2 mA , seguido por $3, 4$ e 5 mA . Os níveis de 6 a 10 mA podem ser determinados apenas dividindo a distância em intervalos iguais (não a real distribuição, mas próxima o suficiente para os gráficos fornecidos). Para o próximo nível, teríamos $10\text{ mA}, 20\text{ mA}, 30\text{ mA}$ e assim por diante. O gráfico da Figura 1.37(b) é chamado de *diagrama semilog*, referindo-se ao fato de que apenas um eixo utiliza escala logarítmica.

E

Os dados fornecem uma faixa de valores de V_F (tensões de polarização direta) para cada nível de corrente. Quanto mais alta a corrente direta, maior a polarização direta aplicada. Em 1 mA, constatamos que V_F pode variar de 0,6 V a 0,68 V, mas, em 200 mA, pode chegar a ser de 0,85 V a 1,00 V. Para toda a faixa de valores de corrente desde 0,6 V em 1 mA até 0,85 V em 200 mA, certamente é uma aproximação razoável usar 0,7 V como o valor médio.

F

Os dados fornecidos revelam claramente como a corrente de saturação reversa aumenta com a polarização reversa aplicada a uma temperatura fixa. A 25 °C, a corrente máxima de polarização reversa sobe de 0,2 nA para 0,5 nA devido a um aumento na tensão de polarização reversa pelo mesmo fator de 2,5. A 125 °C, ela salta de um fator de 2 para o nível elevado de 1 μ A. Note a mudança extrema na corrente de saturação reversa em função da temperatura na medida em que a corrente máxima salta de 0,2 nA a 25 °C para 500 nA a 125 °C (a uma tensão de polarização reversa fixa de 20 V). Um aumento semelhante ocorre a um potencial de polarização reversa de 100 V. Os diagramas semilog das figuras 1.37(c) e (d) fornecem uma indicação de como a corrente de saturação reversa muda conforme as alterações na tensão reversa e na temperatura. À primeira vista, a Figura 1.37(c) poderia sugerir que a corrente de saturação reversa é bastante estável para variações na tensão reversa. No entanto, em alguns casos, isso pode ser o efeito da utilização de uma escala logarítmica para o eixo vertical. Na realidade, a corrente passou de um valor de 0,2 nA a um de 0,7 nA para a faixa de tensões que representa uma mudança de cerca de 6 para 1. O efeito drástico da temperatura sobre a corrente de saturação reversa é claramente mostrado na Figura 1.37(d). Em uma tensão de polarização reversa de 125 V, a corrente de polarização reversa aumenta de um nível de cerca de 1 nA a 25 °C para cerca de 1 μ A a 150 °C, um aumento de fator 1.000 em relação ao valor inicial.

G

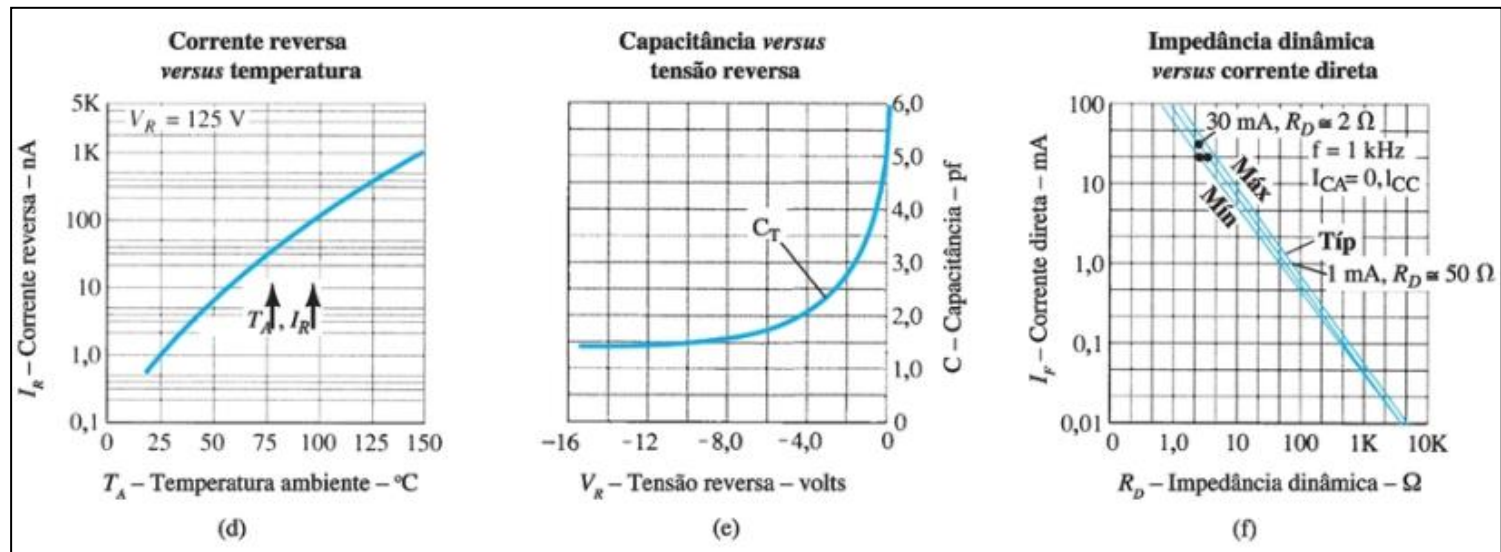
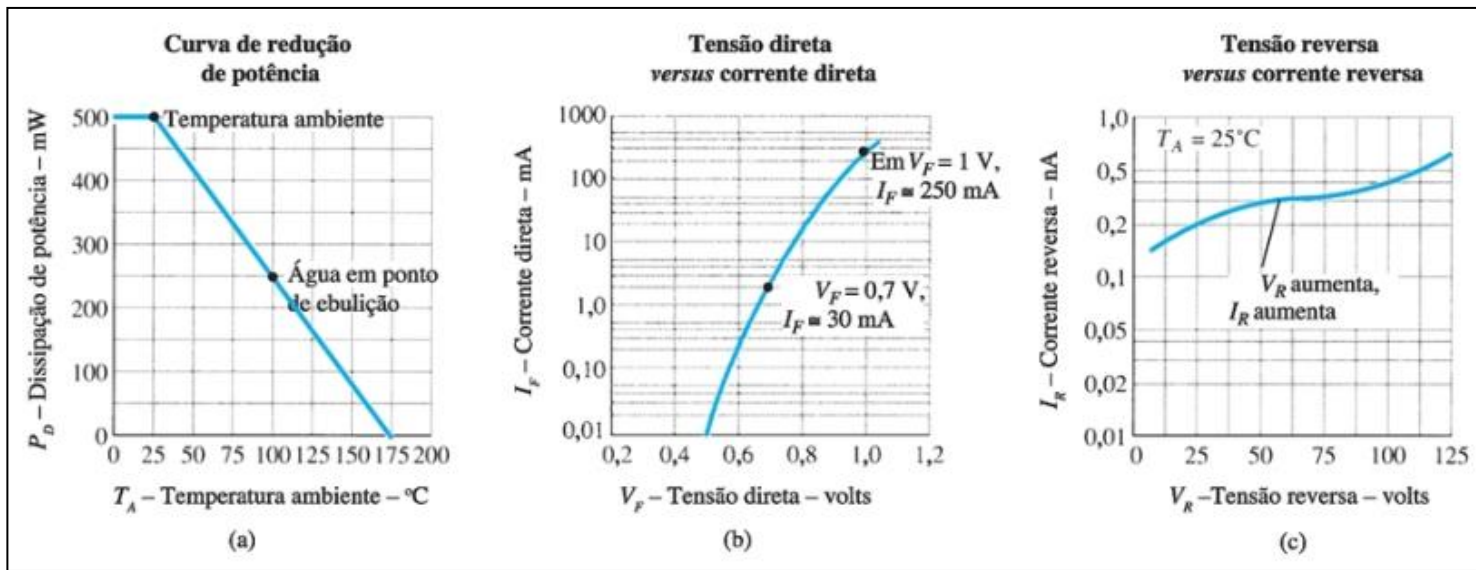
Como mostram os dados listados na Figura 1.37(e), a capacitância de transição em uma tensão de polarização reversa de 0 V é igual a 5 pF em uma frequência de ensaio de 1 MHz. Note a forte mudança no valor da capacitância à medida que a tensão de polarização reversa aumenta. Como mencionado anteriormente, essa região sensível pode ser bem aproveitada no projeto de um dispositivo (Varactor; Capítulo 16) cuja capacitância terminal seja sensível à tensão aplicada.

H

O tempo de recuperação reversa é de 3 μ s para as condições de ensaio indicadas. Não é um tempo rápido para muitos dos sistemas de alto desempenho em uso nos dias de hoje. No entanto, é aceitável para uma variedade de aplicações de baixa e média frequências.

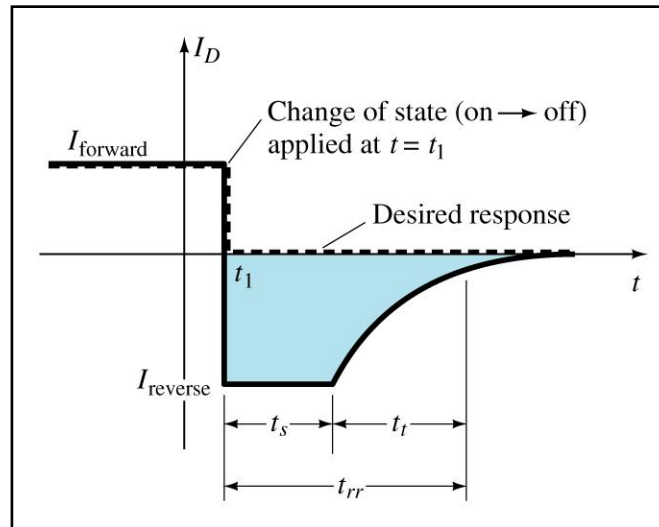
As curvas da Figura 1.37(f) fornecem uma indicação da magnitude da resistência CA do diodo em relação à corrente direta. A Seção 1.8 demonstrou claramente que a resistência dinâmica de um diodo diminui com o aumento da corrente. Ao subirmos pelo eixo da corrente na Figura 1.37(f), fica evidente que, se seguirmos a curva, a resistência dinâmica diminuirá. Em 0,1 mA, ela é próxima de 1 k Ω ; em 10 mA, 10 Ω ; e, em 100 mA, apenas 1 Ω ; isso claramente sustenta a discussão anterior. A menos que se tenha experiência em leitura de escalas logarítmicas, será desafiador interpretar a curva para os valores indicados, pois trata-se de um *diagrama dílog*. Tanto o eixo vertical quanto o horizontal empregam uma escala logarítmica.

Quanto mais se tem contato com as folhas de dados, mais “familiares” elas se tornam, em especial quando se compreende claramente o efeito de cada parâmetro para a aplicação analisada.



Reverse Recovery Time (t_{rr})

Reverse recovery time is the time required for a diode to stop conducting when switched from forward bias to reverse bias.



In the **forward-bias state** it was shown earlier that there are a large number of electrons from the n-type material progressing through the p-type material and a large numbers of holes in the n-type material – **a requirement for conduction**.

The electrons in the p-type material and holes progressing through the n-type material establish a large number o minority carriers in each material In each material.

If the applied voltage should be reversed to establish a reverse bias situation, we would ideally like to see the diode change instantaneously frm the conduction state to the nonconduction state.

However because of the large number of minority carriers in each material, the diode current will simply reverse as shown in the figure and stay at this measurable level for the period of time **t_s (storage time)** required for the minority carriers to return to their majority-carrier state in the opposite material.

Eventually, when this storage phase has passed, the current will be reduced in leve to that associated with the nonconduction state. This second period of time is the **t_t (transition time)**. The **$(t_{rr}) = t_s + t_t$** .

Links Úteis

Videos - pn junctions

[Animation | How a pn junction semiconductor works | forward reverse bias | diffusion drift current \(6:36 min\)](https://www.youtube.com/watch?v=OyC02DWq3ml)

<https://www.youtube.com/watch?v=OyC02DWq3ml>

[The PN Junction. How Diodes Work? \(10:36 min\)](https://www.youtube.com/watch?v=JBtEckh3L9Q)

<https://www.youtube.com/watch?v=JBtEckh3L9Q>

[Formation and Properties of Junction Diode \(2:44 min\)](https://www.youtube.com/watch?v=4SIfaocMfdA)

<https://www.youtube.com/watch?v=4SIfaocMfdA>

[p-n-Junction-And-Diodes \(4:07min\)](https://www.youtube.com/watch?v=W6QUEq0nUH8)

<https://www.youtube.com/watch?v=W6QUEq0nUH8>

Links Úteis

Videos - pn junctions

[Zener Diode Fully Explained \(11:29 min\)](https://www.youtube.com/watch?v=d4zO39K_ce8)

https://www.youtube.com/watch?v=d4zO39K_ce8

[How Does a Diode Work? Intro to Semiconductors \(p-n Junctions in the Hood\) \(23:32min\)](https://www.youtube.com/watch?v=b3xys6rYM_Q)

https://www.youtube.com/watch?v=b3xys6rYM_Q

[P-N junction solar cells \(2>32min\)](https://www.youtube.com/watch?v=2AX0qvnjSnM)

<https://www.youtube.com/watch?v=2AX0qvnjSnM>

[Light Emitting Diode \(LED\) \(7:53min\)](https://www.youtube.com/watch?v=GodkGafZsh4)

<https://www.youtube.com/watch?v=GodkGafZsh4>