



CET188

Estrutura da Matéria

Prof. Rogério Monteiro

Metais e semicondutores

Aula A11

Tópicos da aula

- Elétrons livres em uma dimensão: o gás de elétrons.
- Semicondutores.

Referências

- Eisberg, R., Resnick, R. Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos. núcleos e partículas. Editora Campus. 1979.
- Notas de aula do curso de Estrutura da Matéria do Prof. Arturo Samana (2013).
- Notas de aula do curso de Estrutura da Matéria da Universidade Virtual do Estado de São Paulo.
- Os elementos: Uma exploração visual dos átomos conhecidos no Universo. Theodore Gray. 2016. Blucher

Elétrons livres em uma dimensão: o gás de elétrons

Elétrons livres em uma dimensão

- Para elétrons livres, temos $V(x) = 0$:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} = E\Psi(x) \rightarrow \frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} = -k^2\Psi(x)$$

$$k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$$

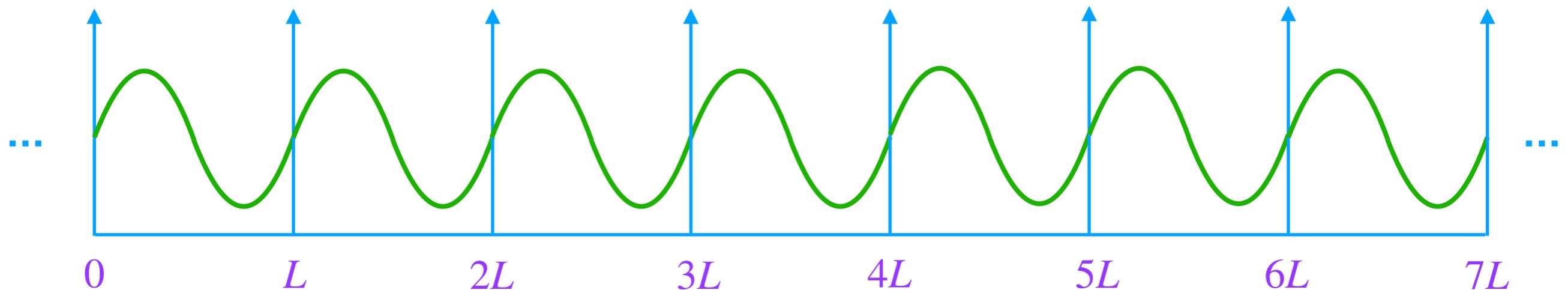
$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$

- Solução da equação de Schrodinger: $\Psi_k(x) = Ae^{ikx}$

Elétrons livres em uma dimensão

- Como fica a interpretação física de $\Psi_k(x)$?
- A integral de $\Psi_k(x)$ diverge para $x \rightarrow \infty$.
- Devemos, portanto tomar condições de contorno periódicas no espaço.

Elétrons livres em uma dimensão



$$\Psi_k(x + L) = \Psi_k(x)$$

condição de contorno periódica

$$\Psi_k(x + L) = Ae^{ikx}e^{ikL} \rightarrow \Psi(x + L) = e^{ikL} \Psi_k(x)$$

$k = p/\hbar$

- Para satisfazer as condições de contorno, devemos ter:

$$e^{ikL} = 1 \rightarrow kL = 2n\pi$$

$$\therefore n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

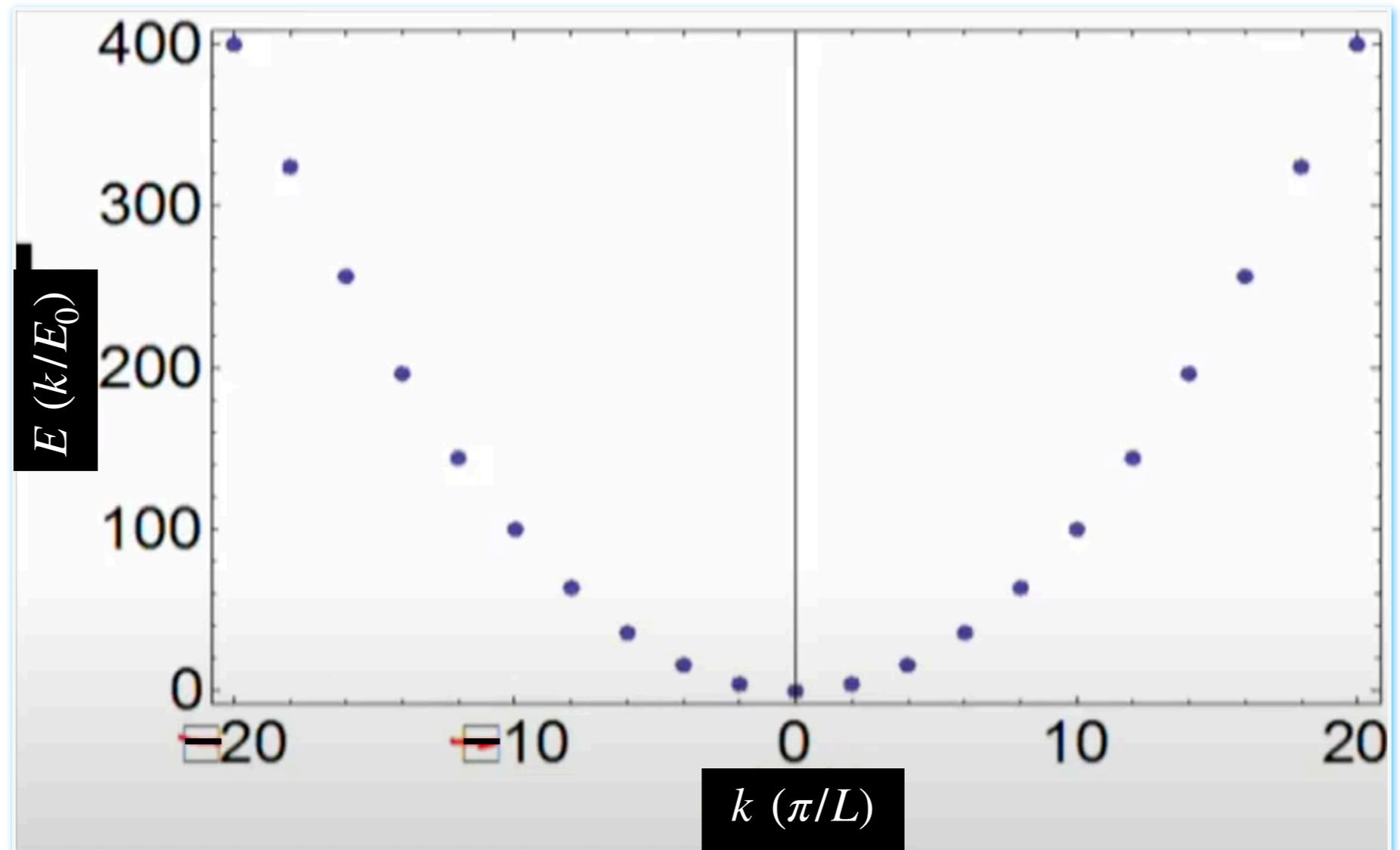
Elétrons livres em uma dimensão

$$k_n = \frac{2n\pi}{L}$$

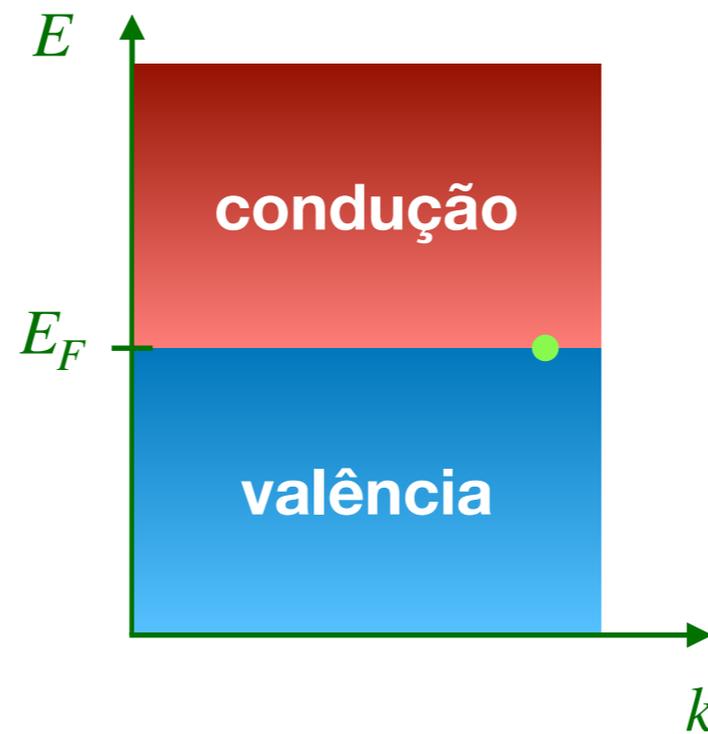
$$\rightarrow E(k_n) = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m}$$

quantização da energia

Há apenas **uma banda** de energia e ela estará sempre **semipreenchida**.



Lembrando...



gap = 0

metal

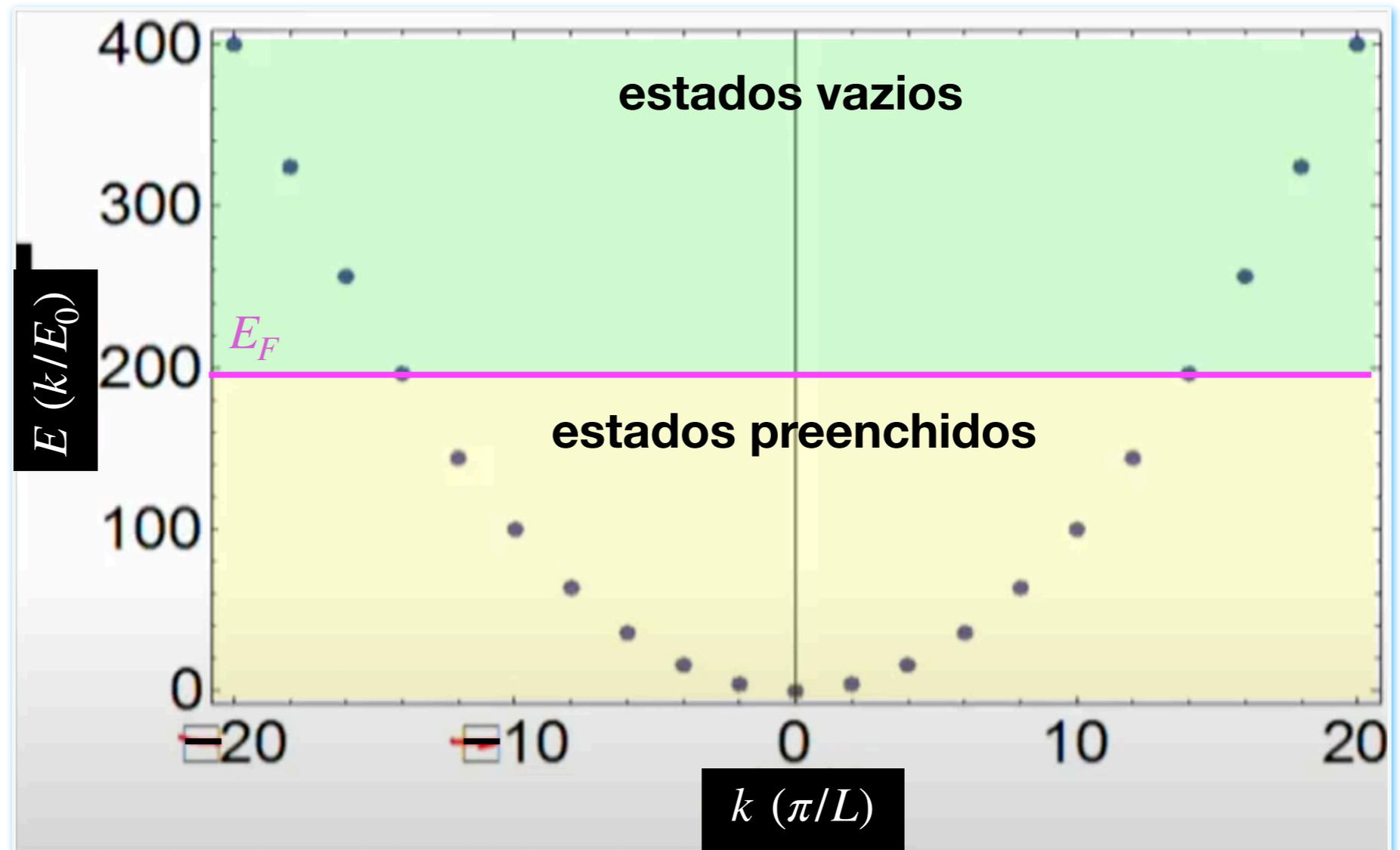
Elétrons livres em uma dimensão

$$k_n = \frac{2n\pi}{L}$$

$$\rightarrow E(k_n) = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m}$$

quantização da energia

Há apenas **uma banda** de energia e ela estará sempre **sempreenchida**.



Bom modelo para descrever o comportamento dos metais

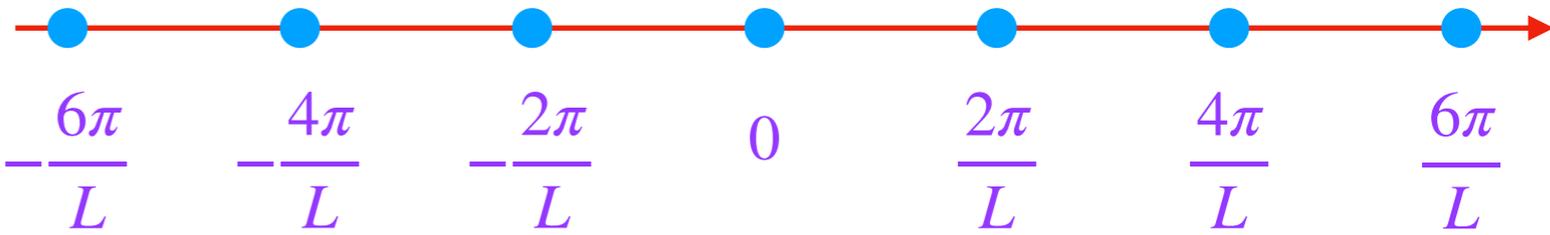
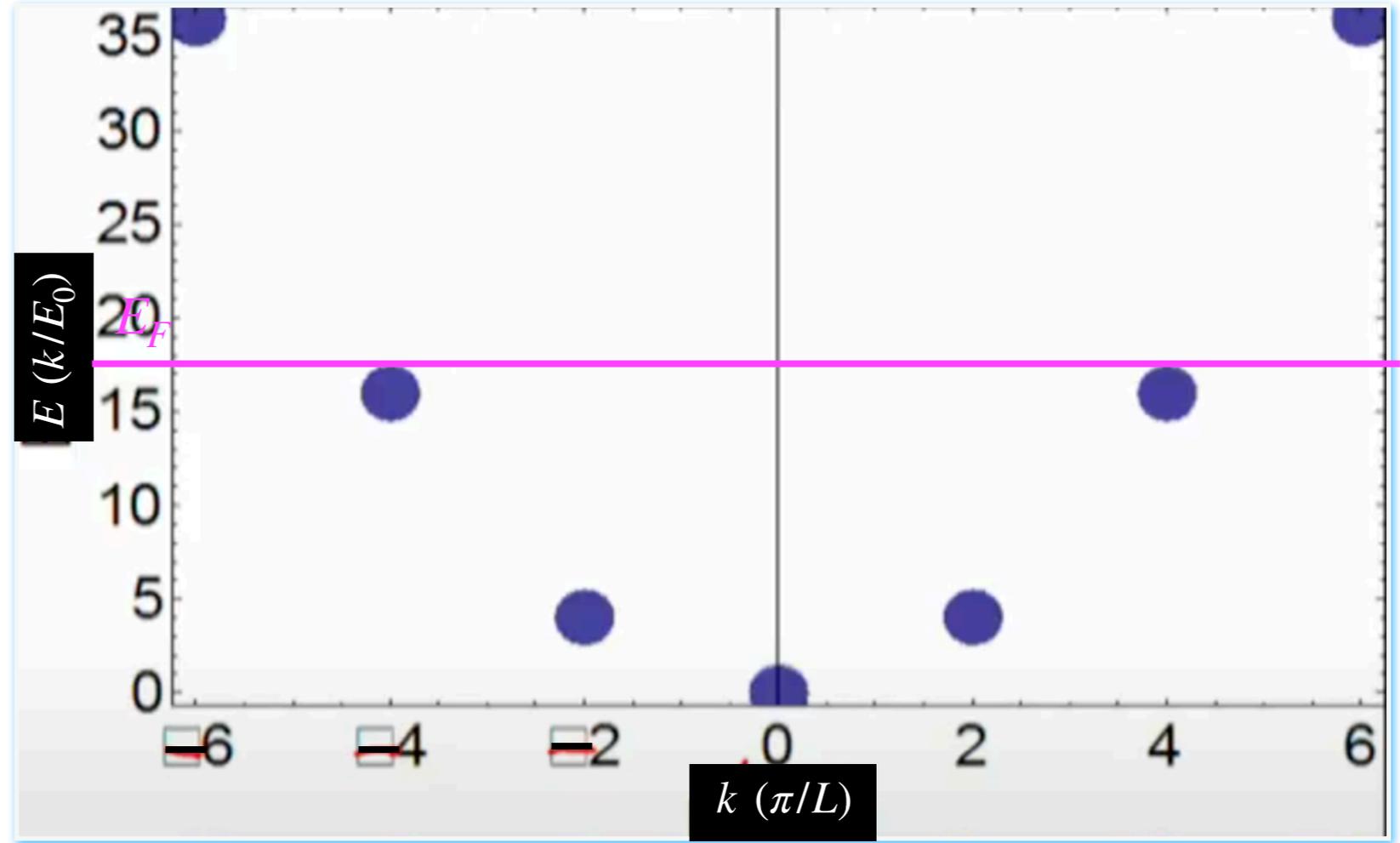
Como são preenchidos os estados?

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$k_n = \frac{2n\pi}{L}$$

Suponha que existam N elétrons para ocupar os estados de energia

Os estados são preenchidos com dois elétrons em cada estado ($s = \pm 1/2$)

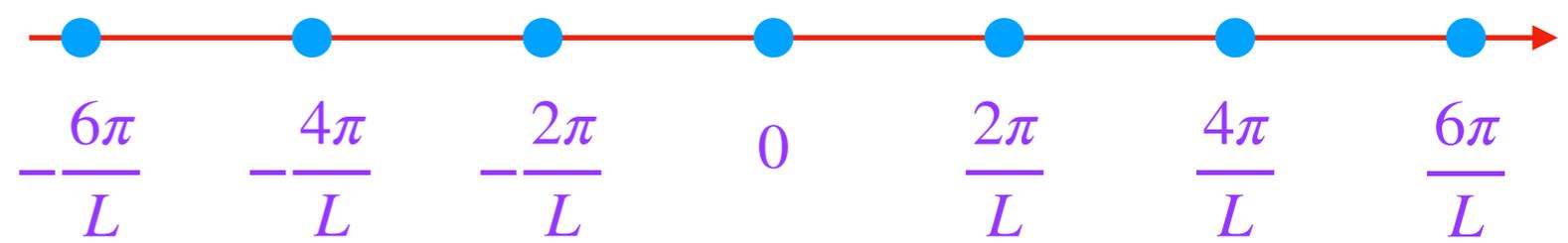
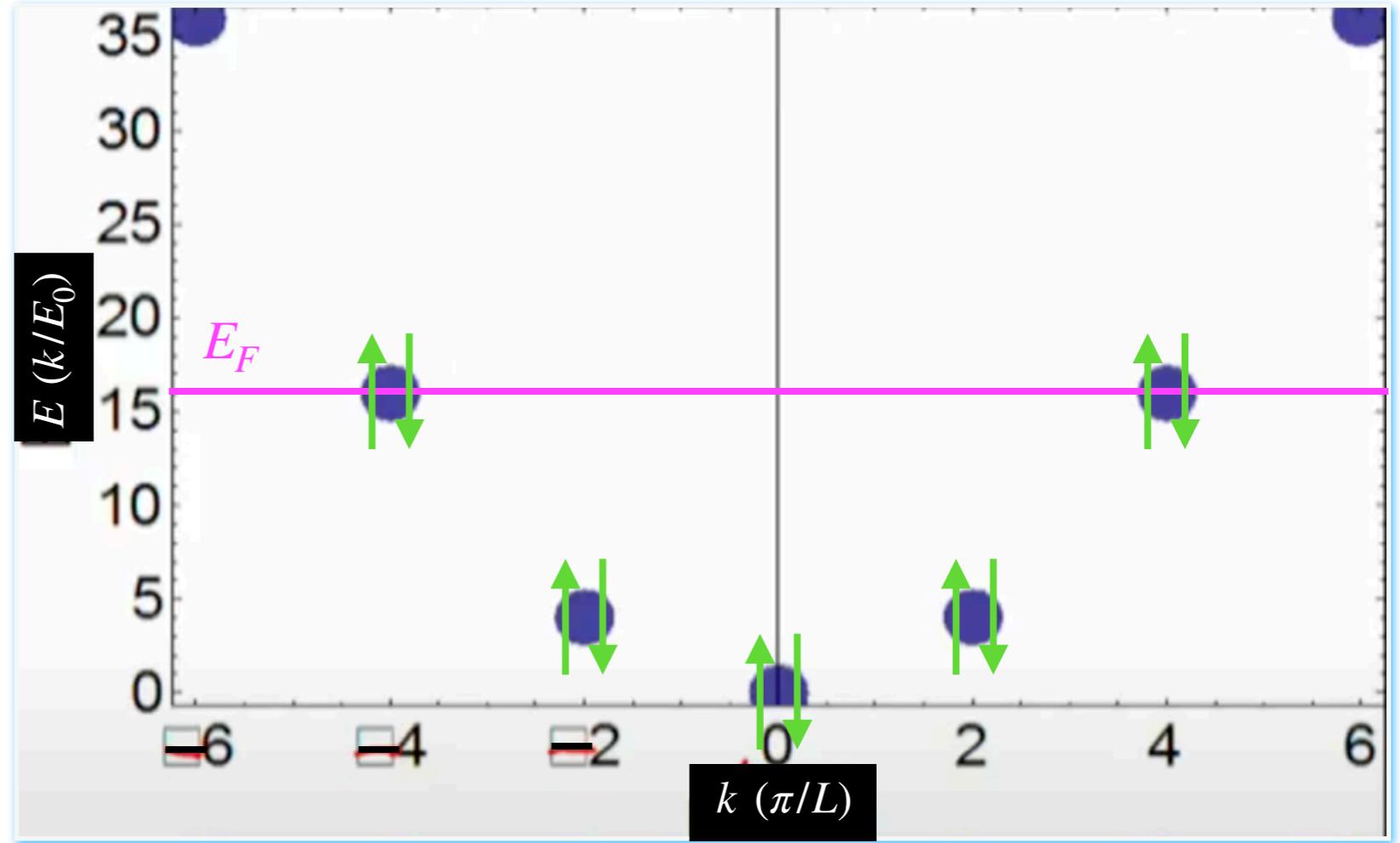


Como são preenchidos os estados?

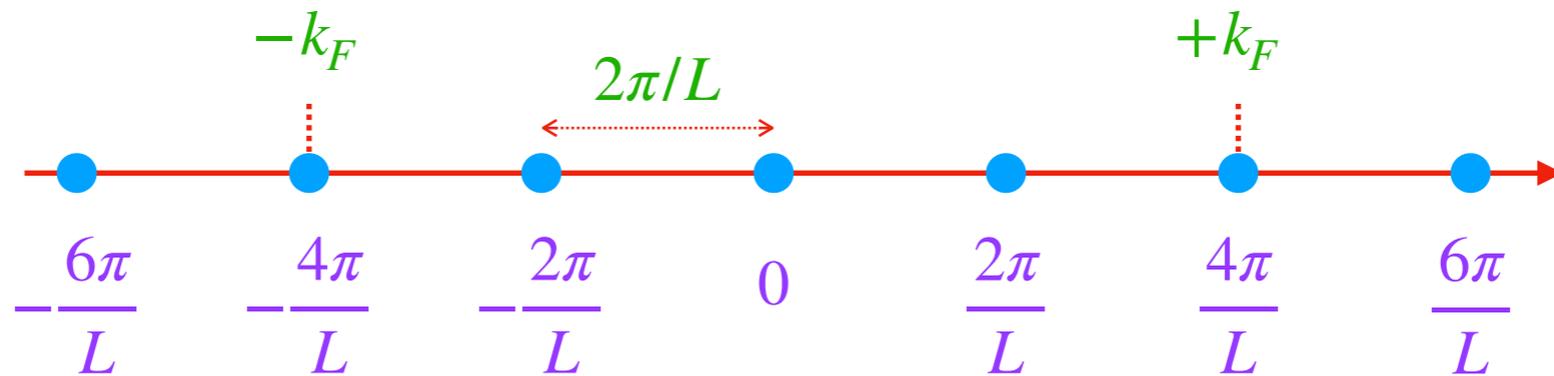
Exemplo: $N = 10$

Os níveis são preenchidos até $k = \pm \frac{4\pi}{L}$

$$\therefore E_F = 16 \frac{\hbar^2 \pi^2}{2mL^2}$$



Energia de Fermi em uma dimensão



- Para N elétrons, qual seria a energia de Fermi? $E_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m}$
- Considerando que temos o último estado completamente preenchido:

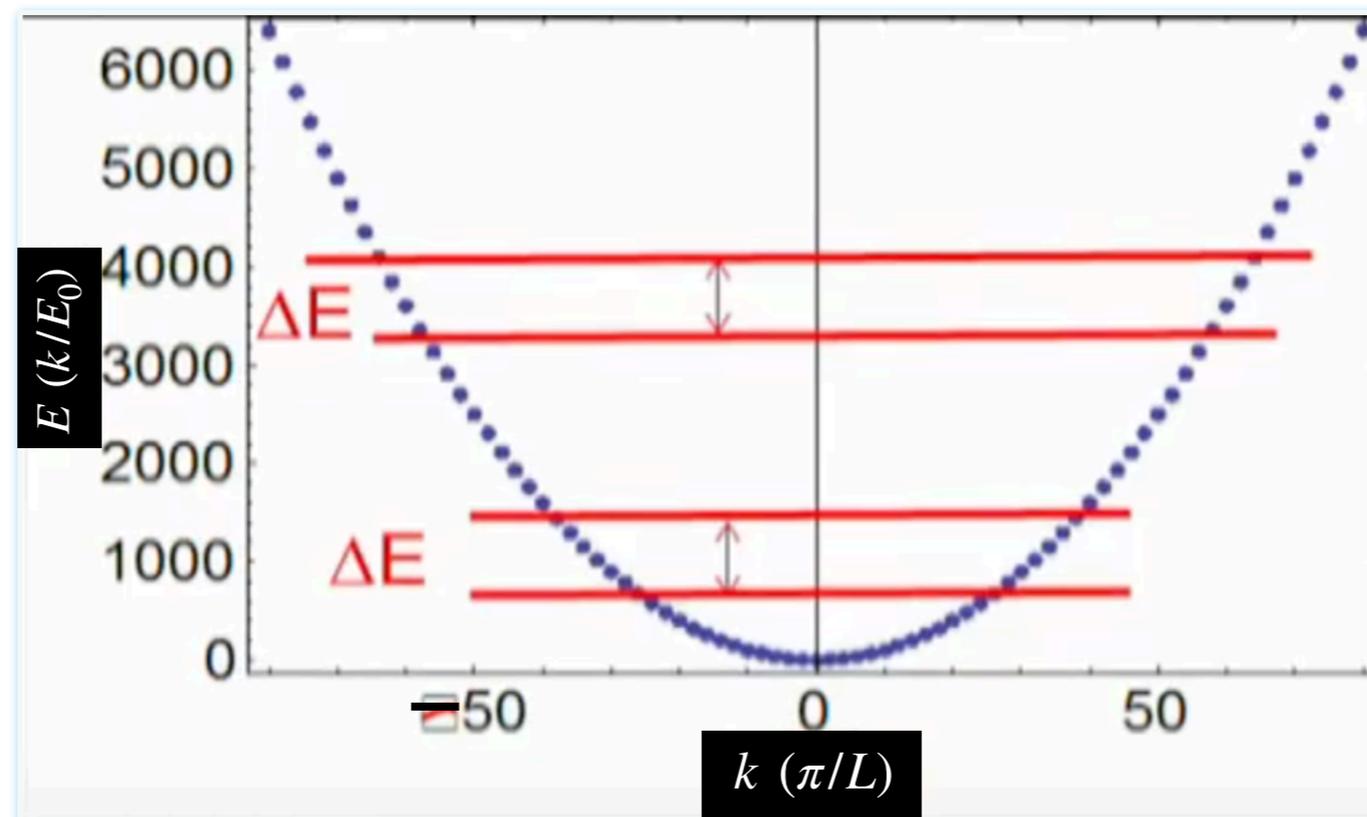
$$N = 2 \left(\frac{2k_F}{2\pi/L} + 1 \right) \rightarrow k_F = \frac{\pi (N - 2)}{2L}$$

$$\therefore E_F = \frac{(N - 2)^2}{4} \frac{\hbar^2 \pi^2}{2mL^2} \xrightarrow{\text{no limite } N \gg 1} E_F = \frac{\hbar^2 \pi^2}{8m} n^2$$

$n = N/L$
densidade

Densidade de estados em uma dimensão

- Para uma dada energia E , quantos estamos teremos entre E e $E + \Delta E$?



Densidade de estados em uma dimensão

- O número de estados N_{es} entre 0 e $\pm k$ será:

$$N_{es} \times \frac{2\pi}{L} = 2k \quad \longrightarrow \quad \therefore N_{es} = \frac{L \sqrt{2m}}{\pi \hbar} E^{1/2}$$

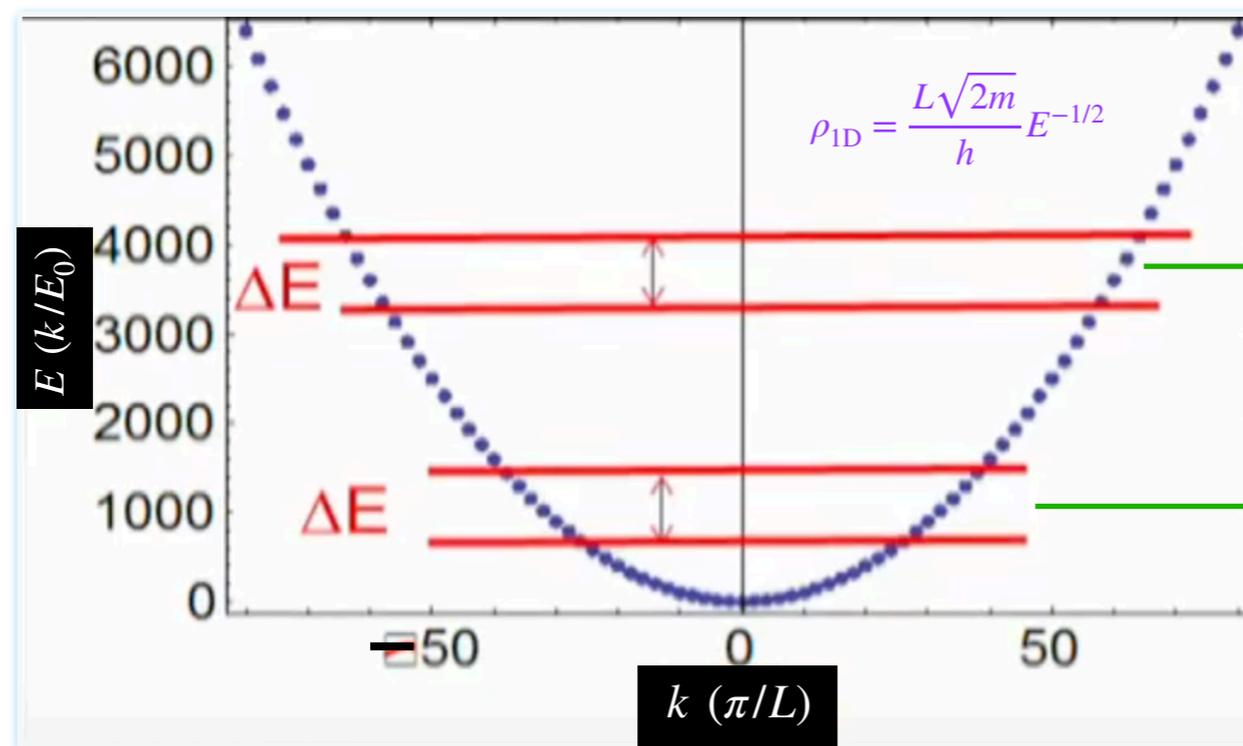
- Qual é a variação de N_{es} para uma variação de energia?

$$\frac{dN_{es}}{dE} = \frac{L \sqrt{2m}}{\pi \hbar} \frac{1}{2} E^{-1/2}$$

- A densidade de estados ρ_{1D} é dada por dN_{es}/dE :

$$\therefore \rho_{1D} = \frac{L \sqrt{2m}}{h} E^{-1/2}$$

Densidade de estados em uma dimensão



densidade de estados menor

densidade de estados maior

a densidade de estados **diminui** com a energia

Distribuição de Fermi-Dirac

- Até aqui não consideramos os efeitos da temperatura do sistema.
- A distribuição de Fermi-Dirac dá a distribuição de férmions com energia E nestas condições:

$$f_D(E, T, \mu) = \frac{1}{e^{(E-\mu)/k_B T} + 1}$$

energia
temperatura
potencial químico

Distribuição de Fermi-Dirac



Distribuição de Fermi-Dirac

- Para um número fixo N de férmions:

$$N = 2 \int_0^{\infty} \rho(E) f_D(E, T, \mu) dE$$

- No caso unidimensional:

$$N = 2 \frac{L\sqrt{2m}}{h} \int_0^{\infty} \frac{1}{e^{(E-\mu)/k_B T} + 1} dE$$

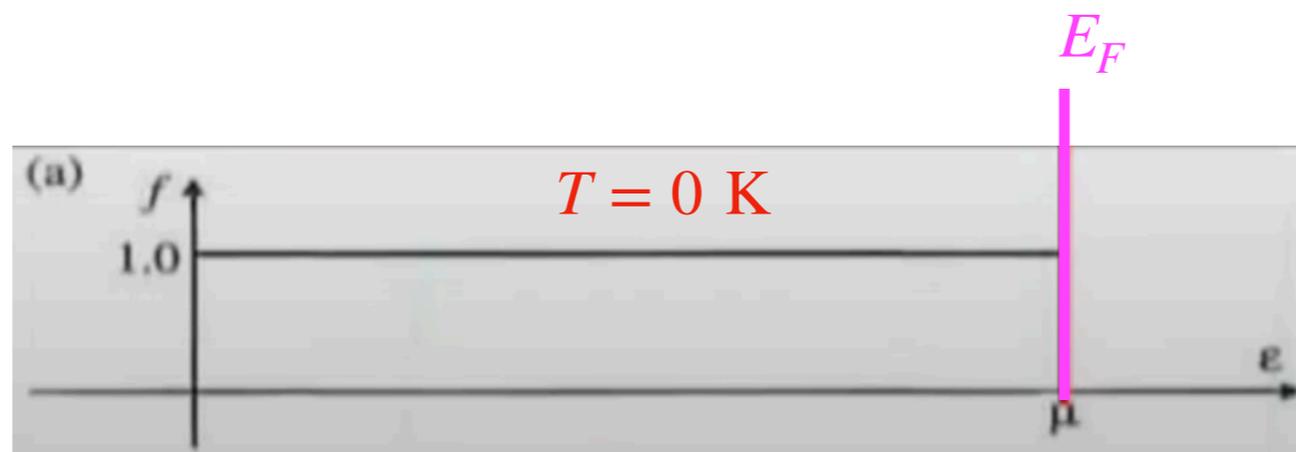
- Se $T = 0$ K:

$$N = \frac{L\sqrt{2m}}{\hbar\pi} \int_0^{\mu(0)} E^{-1/2} dE = \frac{L\sqrt{2m}}{\hbar\pi} 2\mu^{1/2}(0)$$

Distribuição de Fermi-Dirac

- Isolando agora o potencial químico:

$$\mu(T = 0) = \frac{\hbar^2 \pi^2}{8m} n^2 = E_F$$



gás de elétrons em uma dimensão

Problema em três dimensões

gás de elétrons em uma dimensão

$$E_F = \frac{\hbar^2 \pi^2}{8m} n^2$$

$$\rho_{1D}(E) = \frac{L\sqrt{2m}}{h} E^{-1/2}$$

gás de elétrons em três dimensões

$$E_F = \left[\frac{\hbar^2 (3\pi^2)^{2/3}}{2m} \right] n^{2/3}$$

$$\rho_{3D}(E) = \frac{V}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2}$$

- Valores típicos em metais (ex: cobre)

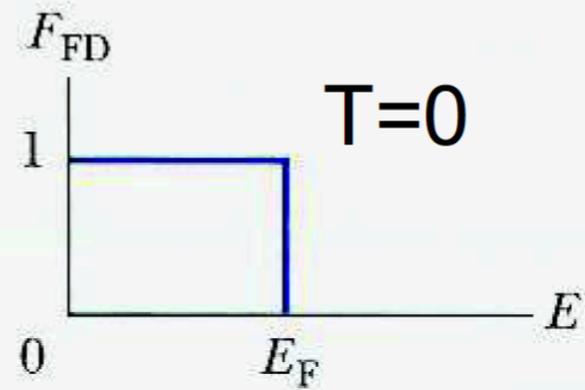
$$E_F \approx 7.03 \text{ eV} = 81600 \text{ K}/k_B$$

$$1 \text{ meV} = 11.6 \text{ K}/k_B$$

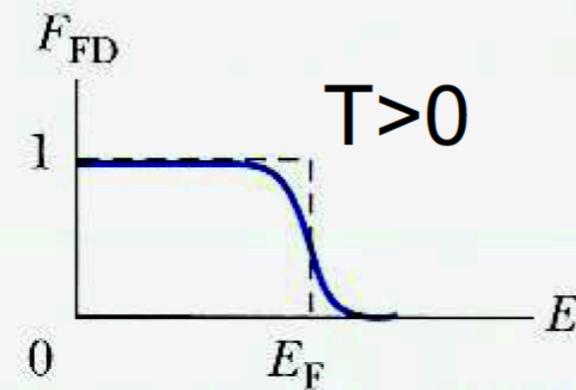
Resumo até aqui

- Em $T = 0$ K os férmions deveriam ocupar o nível de energia mais baixo disponível para eles;
- Mas devido ao princípio de Pauli, os férmions ocuparão os níveis de energia disponíveis até uma dada energia em particular (energia de Fermi).
- Aumentado a temperatura, cada mais férmions poderão ocupar níveis mais altos.
- Para $T > 0$ K há uma pequena probabilidade da agitação térmica promover um férmion para uma energia maior que E_F .

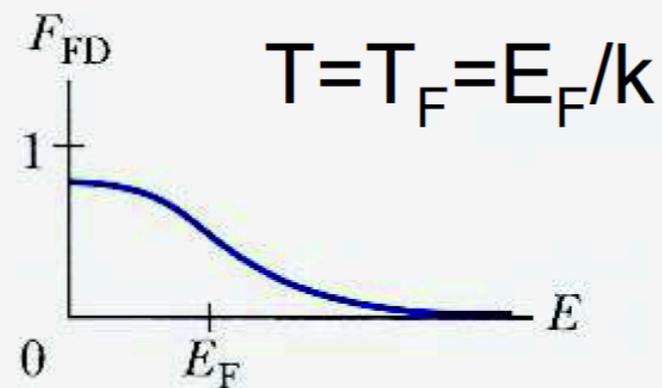
Resumo até aqui



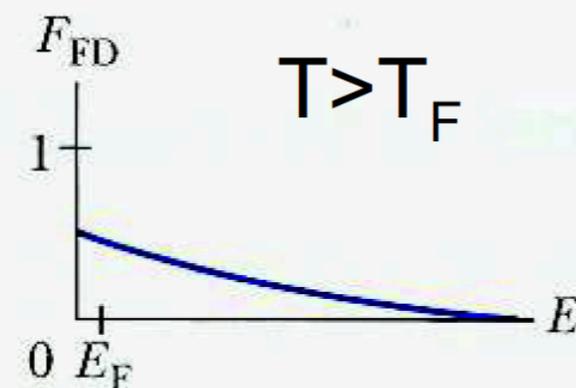
(a)



(b)



(c)



(d)

Exercício resolvido

- Exercício
- Calcule a energia de Fermi para o Au a 0K
 - Calcule a velocidade de Fermi para o Au a 0K
 - Calcule a temperatura de Fermi para o Au a 0K

A densidade do Au é 19.32 g/cm^3 e o peso molar é 197 g/mol . Assumindo que cada átomo contribuiu com 1 e- livre para o gás de Fermi

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\rho N_A}{M} = \frac{19.32 \cdot 6.023 \times 10^{23}}{197} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \frac{\text{eletrons}}{\text{mol}} \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)$$

$$n = \frac{N}{V} = 5.9 \times 10^{28} \text{ elétrons / m}^3 \quad E_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3N}{8\pi V} \right)^{2/3} = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3}{8\pi} n \right)^{2/3}$$

$$E_F(0) = \frac{6.625 \times 10^{-34}}{2 \cdot 9.11 \times 10^{-31}} \left(\frac{3 \cdot 5.9 \times 10^{28}}{8 \cdot 3.14} \right)^{2/3} \approx 5.85 \text{ eV}$$

$$v_F = \left(\frac{2E_F}{m_e} \right)^{1/2} = \left(\frac{2 \cdot 5.85 \times 10^{-19} \text{ J}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}} \right)^{1/2} = 1.39 \times 10^6 \text{ m/s}$$

$$T_F = \frac{E_F}{k} = \frac{5.85 \text{ eV}}{8.62 \times 10^{-5} \text{ eV / K}} = 64000 \text{ K}$$

Assim um gás de partículas clássica tem que ser aquecido a $\sim 64000 \text{ K}$ para ter uma energia média por partícula igual a energia de Fermi a 0 K.

Exercício resolvido

Cálculo da energia de Fermi

EXEMPLO 11-5

Considere a prata no estado metálico, com um elétron (de condução) livre por átomo.

(a) Calcule a partir de (11-57) a energia de Fermi.

A densidade da prata é $10,5 \text{ g/cm}^3$ e seu peso atômico é 108. Assim

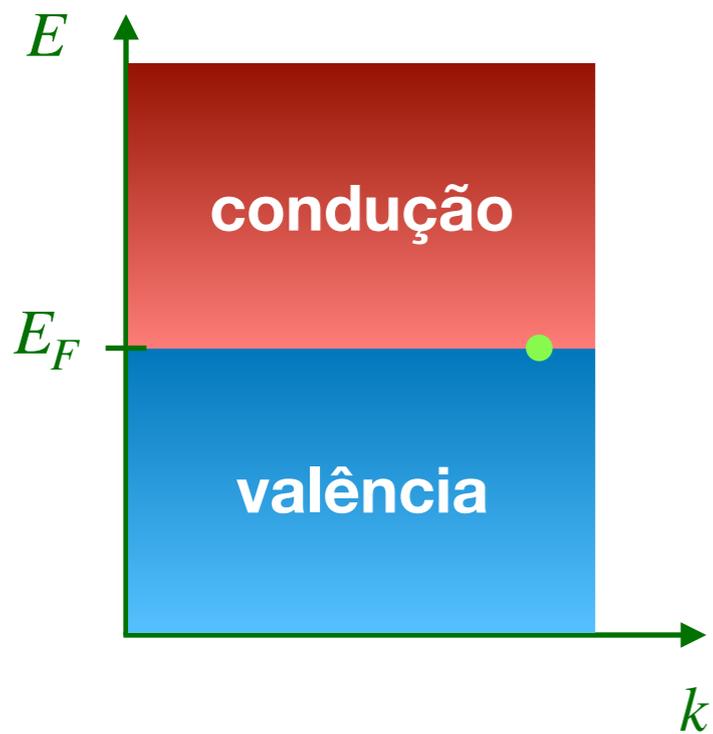
$$n = \frac{\mathcal{N}}{V} = \frac{6,02 \times 10^{23} \text{ átomo/mol} \times 10,5 \text{ g/cm}^3}{108 \text{ g/mol}} \times 1 \text{ elétron livre/átomo}$$
$$= 5,9 \times 10^{22} \text{ elétron livre/cm}^3 = 5,9 \times 10^{28} /\text{m}^3$$

Portanto

$$\varepsilon_F = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{2/3} = \frac{(6,6 \times 10^{-34} \text{ J-s})^2}{8 \times 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}} \times \left(\frac{3 \times 5,9 \times 10^{28} /\text{m}^3}{\pi} \right)^{2/3}$$
$$= 8,8 \times 10^{-19} \text{ J} = 5,5 \text{ eV}$$

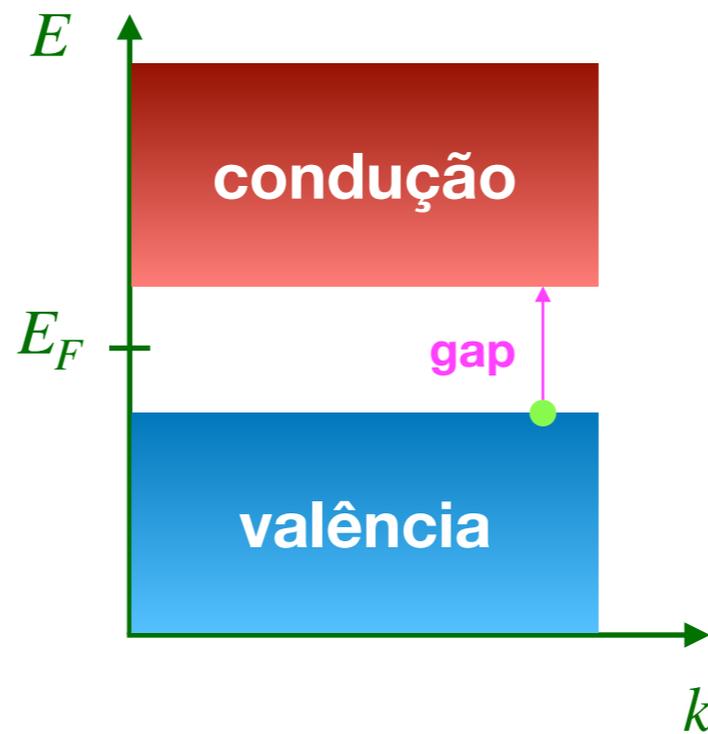


Semicondutores



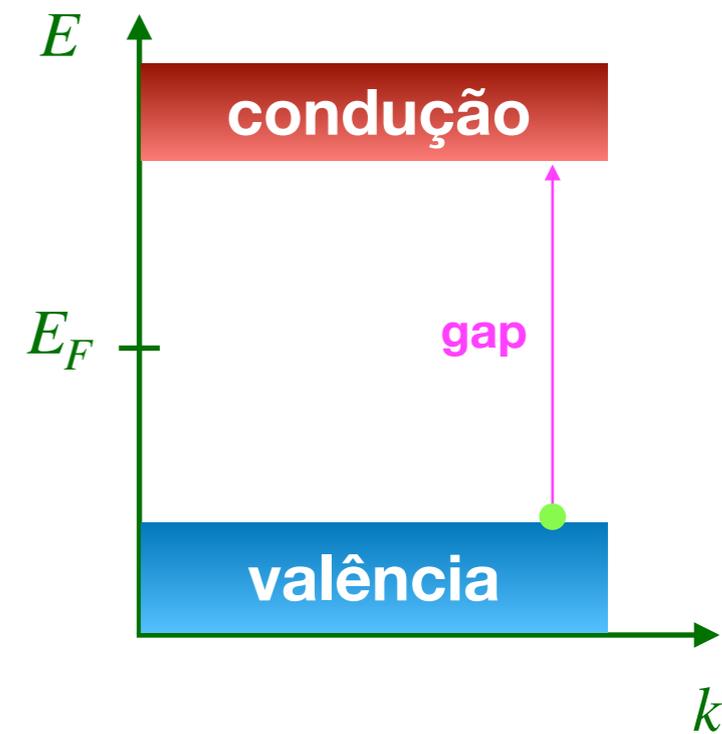
gap = 0

metal



gap $\simeq 1 - 2$ eV

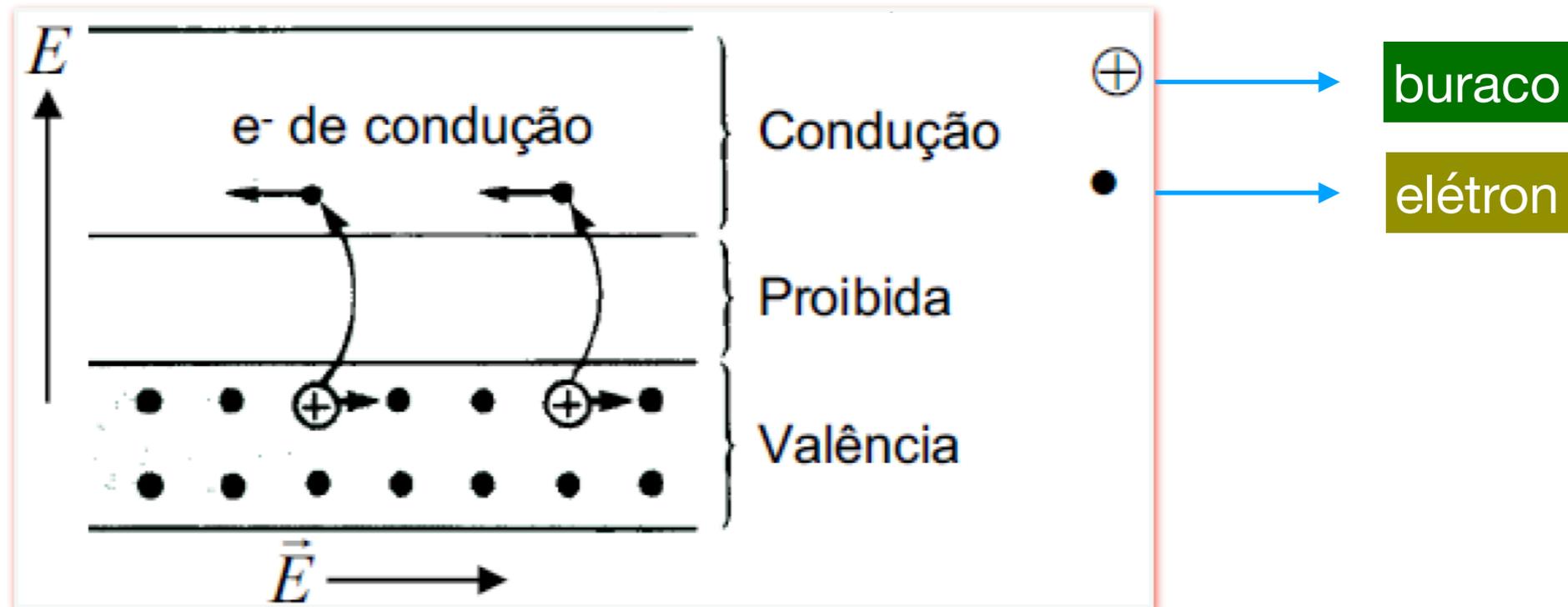
semicondutor



gap $\simeq 5 - 10$ eV

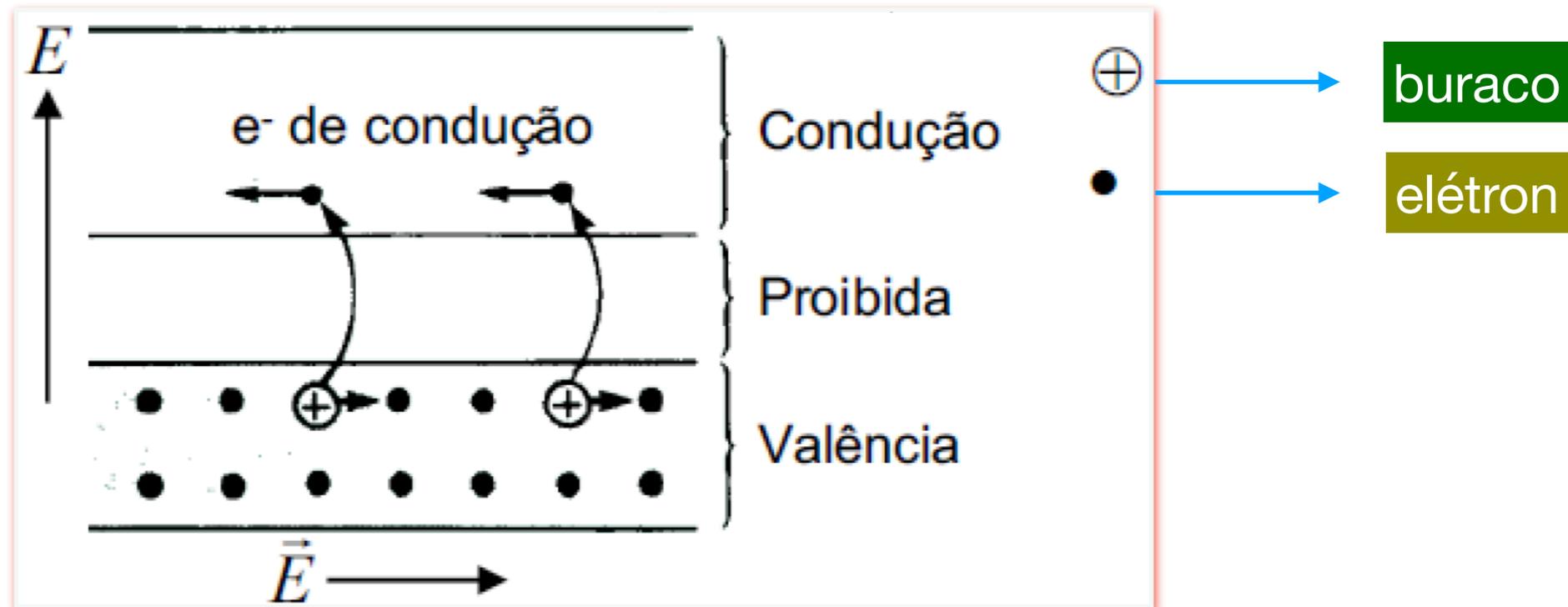
isolante

Condução elétrica em semicondutores



- Um campo elétrico aplicado a um semicondutor produz corrente elétrica devido ao movimento dos elétrons na banda de condução assim como dos buracos na banda de valência.

Condução elétrica em semicondutores



- No caso dos buracos o movimento também se deve aos elétrons que, devido ao campo, ocupam sucessivamente a vacância deixada pelo elétron promovido à banda de condução; assim, a vacância se desloca no sentido oposto.

Condução elétrica em semicondutores

- Uma característica importante dos semicondutores é que a sua condutividade aumenta com a temperatura, ao contrário dos metais.
- Por consequência, sua resistividade diminui.
- Com o aumento da temperatura, o número de elétrons aumenta, já que mais elétrons são excitados e transferidos à banda de condução.
- Obviamente, o número de buracos também aumenta.

Condução elétrica em semicondutores

Semicondutor	E_g (eV)		κ	Semicondutor	E_g (eV)		κ
	0 K	293 K			0 K	293 K	
Si	1,15	1,11	11,8	CdTe	1,56	1,44	10,2
Ge	0,74	0,67	15,9	PbS	0,28	0,37	17,0
Te	—	0,33	—	InP	1,41	1,27	12,4
GaAs	1,53	1,35	13,1	CdSe	1,85	1,74	10,1
InSb	0,23	0,16	17,8	GaP	2,40	2,24	11,1
ZnS	—	3,54	5,2	PbTe	0,19	0,25	30,1

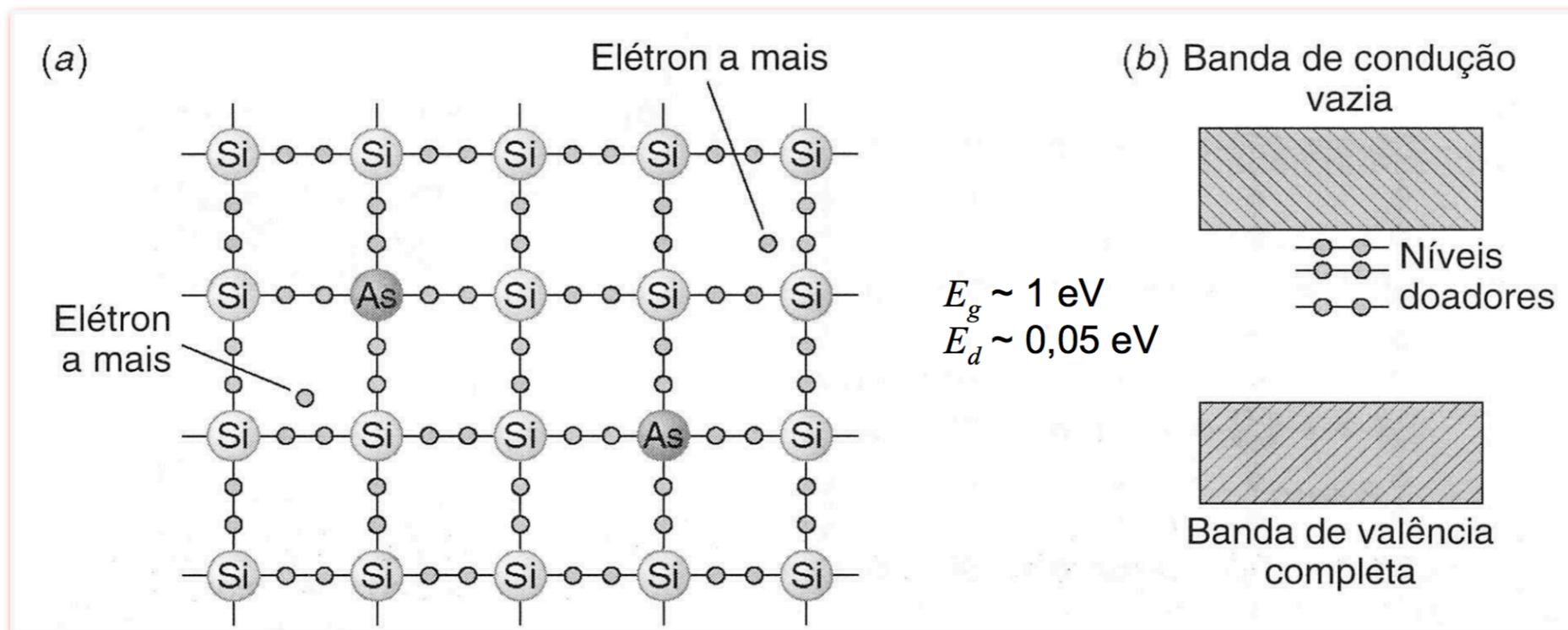
Largura da banda proibida E_g e da constante dielétrica κ para alguns semicondutores.

Dopagem de semicondutores

- O processo de dopagem de semicondutores consiste na adição de uma pequena quantidade de impureza ao material.
- A dopagem tem por objetivo alterar o comportamento elétrico do semicondutor.
- Existem dopantes doadores e receptores que irão produzir os semicondutores tipo n e tipo p , respectivamente.

Semicondutores tipo n

- Exemplo: silício (Si, valência 4) dopado com arsênio (As, valência 5)



ionizando o As, o quinto elétron é removido e se torna livre para ocupar a banda de condução

Silício

Silicon
Si

14 Silicon

SILICON-BASED LIFE-FORMS have been the subject of speculation in science fiction ever since chemists pointed out that silicon, of all the elements, is most like its neighbor, carbon (6), in its ability to form complex molecular chains, in some ways not unlike the long-chain carbon molecules that are reading this text. (That means you.)

But it now seems quite clear that when silicon-based life emerges, at least on this planet, it will not be due to silicon's ability to form molecular chains, but rather to its ability to form semiconducting crystals. Computer chips start out as common white silica beach sand (silicon dioxide) and end as nearly perfect single crystals of hyperpure silicon, etched with patterns beyond the resolution of visible light. That this can be done at all is remarkable; that your average child's toy today contains more computing power than the Apollo moon rockets is the kind of thing that turns civilization on its head. Or replaces it.

▼ Large silicon crystal boules rejected for chip making.

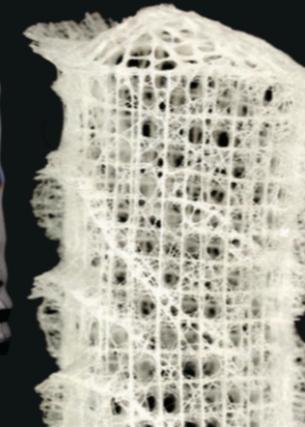


◀ Low-purity—but pretty—molten blob of silicon from the first step of refining from sand.

The bones of the earth—the rock, sand, clay, and soil—consist in very large part of silicate minerals, combinations of silicon and oxygen (8) with smaller amounts of aluminum (13), iron (26), calcium (20) and others. (Only oxygen occurs in a larger quantity than silicon in the earth's crust. So if the computers take over, they'll have plenty of raw material to breed with, or whatever it is they do.)

About the only thing that doesn't have a lot of silicon in it is you: While some sea sponges grow bones of silica glass, your bones, assuming you are not a sea sponge, are calcium phosphate, in the form of rigid hydroxyapatite foam with almost no silicon. It is unclear why most earthly life evolved using our ubiquitous silicon only in incidental ways (unlike those clever sea sponges and computers), opting instead for phosphorus—which, as you can read on the next page, is in tragically short supply.

▼ A Venus's Flower Basket's glass (silica) skeleton.



▲ This silicon boule was pulled out of the melting pot prematurely. We're seeing the underside, where molten silicon dripped off.



▲ A bowlful of diced silicon chips.



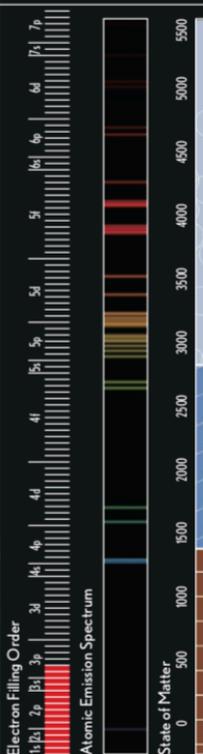
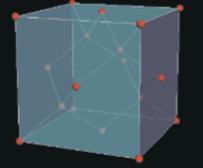
▲ Silicon is not silicone! This implant is made of soft silicone rubber, not hard crystalline silicon.

▼ High-purity refined silicon.



Elemental

Atomic Weight
28.0855
Density
2.330
Atomic Radius
111pm
Crystal Structure



Arsênio

Arsenic

As

33

Arsenic



PARIS GREEN, or copper acetoarsenite, is one of the few chemicals that can be used both as an artist's pigment and as a rat poison.

Given how strongly arsenic is associated with poison, it may come as a surprise that it is intentionally added to the feed of chickens raised for human consumption. It turns out that organic arsenic compounds are less toxic than pure arsenic, and actually promote the growth of chickens. There is some evidence that very low concentrations may be required for optimal health in chickens, possibly even in humans. (It should not really surprise anyone, however, that under some conditions the arsenic in chicken feed can end up getting converted back to its toxic inorganic form. Generally speaking, when an idea sounds as stupid as intentionally feeding arsenic to chickens, it probably is.)

Another idea that turns out to be as stupid as it sounds is using arsenic as a pigment. Paris green, also known as emerald green, was popular in the 19th century—William Morris himself, the great arbiter of taste in Victorian England, promoted its use in wallpaper over new-fangled synthetic pigments. The trouble was that in damp English winters mold growing on the wallpaper converted the arsenic to gas form, which sickened and even killed those living in the room. The more green your wallpaper, and the damper the winter, the sicker you got. Could it be that the common belief that damp weather is unhealthy originated with green wallpaper? Move to a nice, dry climate for a few months, and you feel much better! But was it the pleasant weather or the fact that you

◀ Glass ampoule filled with pure arsenic metal granules.

weren't breathing arsenic vapor anymore? Unaware of the latter possibility, people at the time naturally concluded it was the former. Besides, who's going to argue with a doctor who orders you to spend a month at the beach?

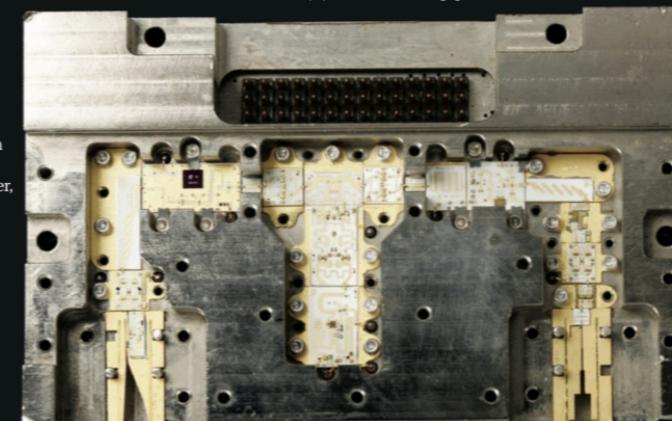
While it is an unsettled question whether arsenic in very low concentrations is an essential nutrient, the next element is well known for having a dual nature as nutrient and poison.

▶ Chromated copper arsenate-treated wood is now banned, but still found everywhere.



◀ Why someone would carry a small tin of arsenic, I do not know.

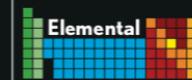
▼ This gallium arsenide microwave amplifier is like a city unto itself.



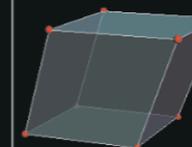
▶ A mixture of realgar (As₂S₃) and orpiment (As₂S₃).



▲ Paris green, copper(II) acetoarsenite, is equally useful in pigments and rat poison.

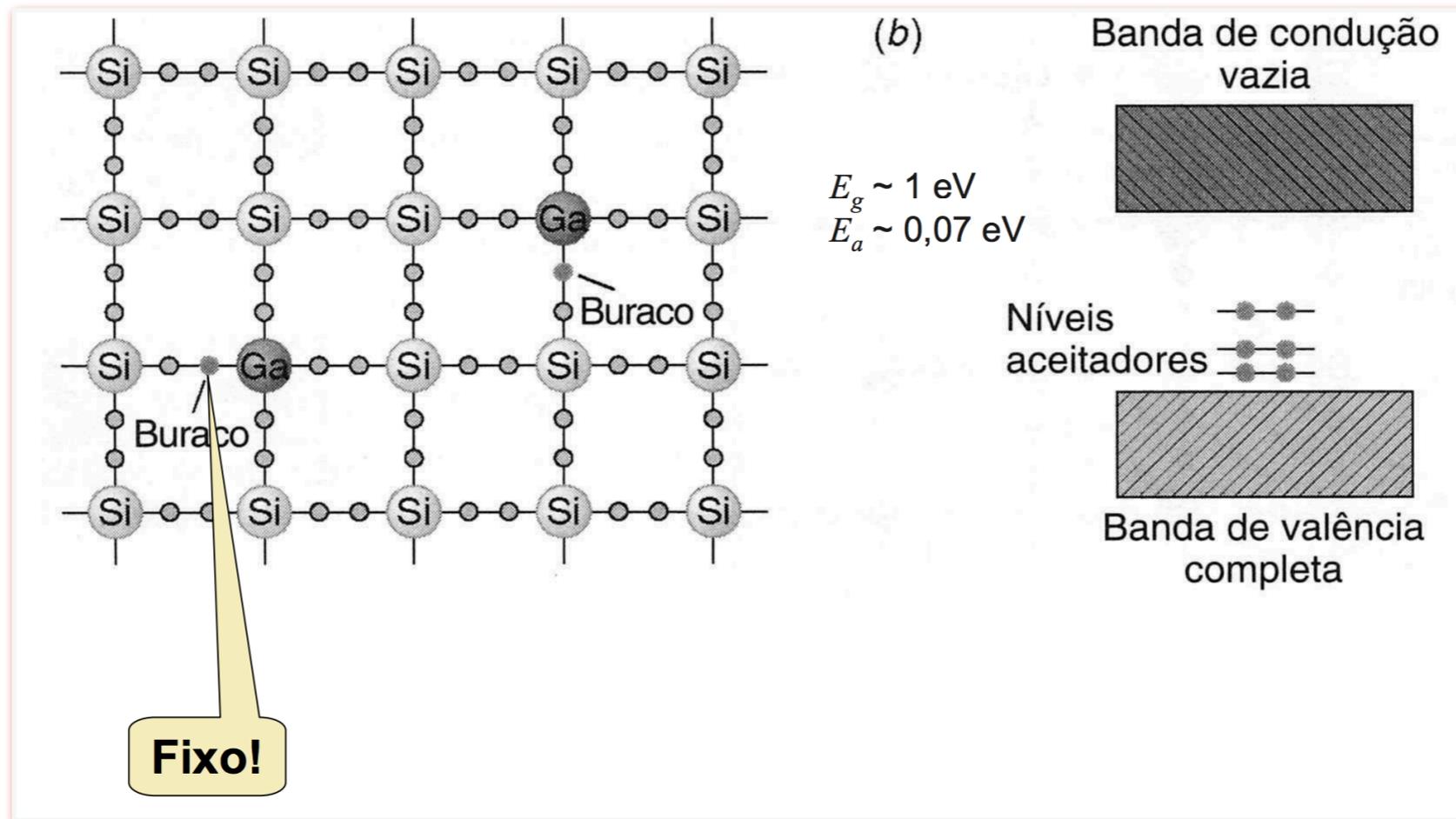


Atomic Weight
74.92160
Density
5.727
Atomic Radius
114pm
Crystal Structure



Semicondutores tipo p

- Exemplo: silício (Si, valência 4) dopado com gálio (Ga, valência 3)



O gálio funciona como um aceitador de elétrons quando substitui o silício na estrutura cristalina.

Gálio

Gallium

Ga

31



Gallium

MERCURY (80) IS OFTEN CITED as the only metal element liquid at room temperature, but this reveals a climatological bias. In more tropical, less air-conditioned parts of the world, gallium and cesium (55) would be on the list too; they melt at a comfortable 85.57°F (29.76°C) and 83.2°F (28.44°C) respectively.

Even in Alaska gallium will literally melt in your hand—quite an unusual experience, though one you're not likely to repeat: While gallium is not known to be toxic, it tends to stain skin dark brown and is best played with in a plastic bag.

Gallium's low melting point finds a practical application in a patented alloy known as Galinstan—its name from the starting syllables of gallium, indium (49) and *stannum*, the Latin name for tin (50)—which is liquid down to -2.2°F (-19°C). If you buy a fever thermometer today that looks like a mercury thermometer, it most likely contains Galinstan, because mercury has been banned in that application for years.

But gallium's most important modern use is in semiconductor crystals. (This is true of most of the elements on or near the diagonal line of elements known as metalloids.) Silicon semiconductors stop working above a few gigahertz, but gallium arsenide circuits operate as high as 250 gigahertz, which is at the upper end of the microwave frequency range.

Gallium is also present in nearly all light-emitting diodes (LEDs), in the form of gallium arsenide, gallium nitride, indium gallium nitride, aluminum gallium nitride, and numerous variations thereof.

But gallium's usefulness in semiconductors pales in comparison to the fundamental and ubiquitous role of silicon (14), and the historical role of their mutual neighbor

◀ Gallium melts at just above room temperature. A blow-dryer turned this perfect cube surreal.



▶ Gallium arsenide computer chips on a wafer.

▶ Galinstan-alloy fever thermometer.

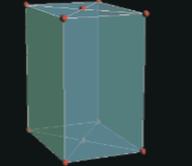
▲ The mineral bauxite, while not primarily a gallium mineral, contains impurities of this element and is the major commercial source of it.

▶ High-purity gallium destined for use in computer chips.

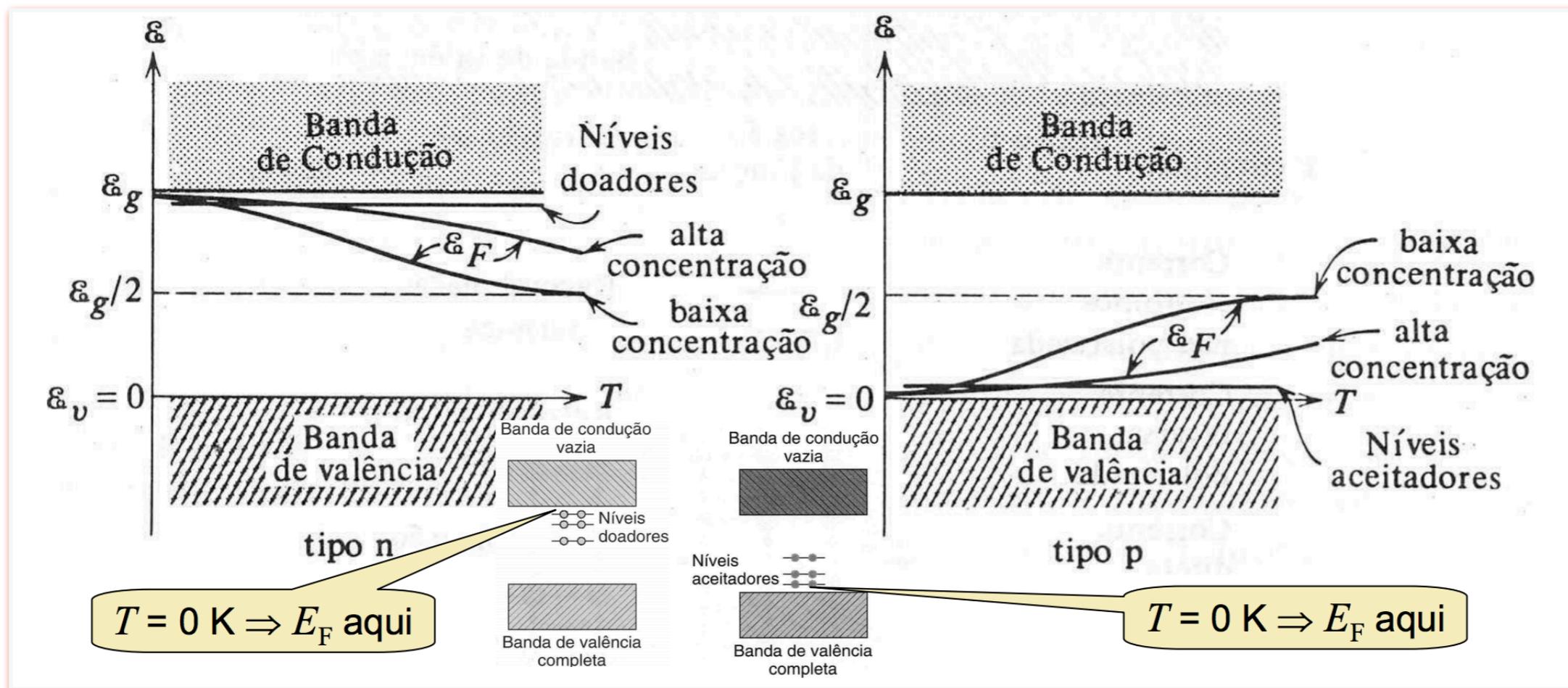
◀ Blu-ray® gallium nitride laser diode in operation.



Atomic Weight
69.723
Density
5.904
Atomic Radius
136pm
Crystal Structure



E_F em semicondutores dopados



A possibilidade de controle das características que os semicondutores apresentam em relação à condução elétrica, fazem deles materiais muito utilizados na produção de componentes eletrônicos, tais como diodos, transistores, LEDs e lasers.

Junção p - n

- Quando um semicondutor tipo n entra em contato com um do tipo p ocorre uma concentração desigual de elétrons e buracos.
- Isto promove a difusão de elétrons para o tipo p e de buracos para o lado n , até que se atinja o equilíbrio.
- Isto dá origem a uma diferença de potencial V entre os lados n e p (potencial de contato).

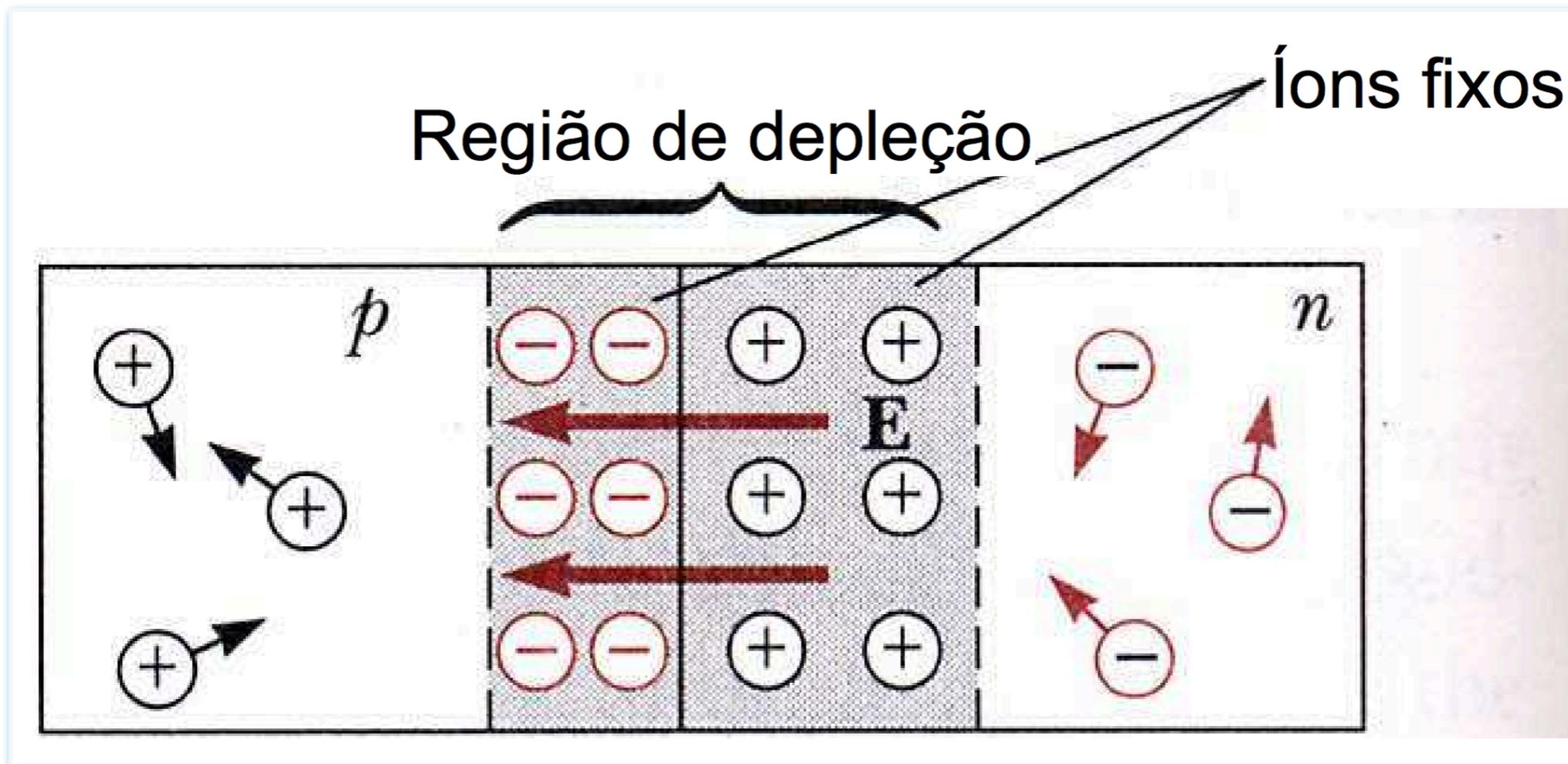
Funcionamento de um diodo

- Ao se juntar um elemento p a um elemento n , temos a seguinte situação: o elemento p tem excesso de lacunas e o elemento n tem excesso de elétrons.
- No ponto onde os dois cristais se tocam, tende a haver uma migração de elétrons e lacunas, até que se estabeleça um equilíbrio.
- Com o equilíbrio na região da junção, deixam de existir portadores majoritários (elétrons livres ou lacunas); é a camada de **depleção**.

Funcionamento de um diodo

- A camada de depleção impede que se gere um equilíbrio completo entre os cristais p e n .
- Explicação: os elétrons do cristal n não encontram lacunas para se movimentar pela camada de depleção; o mesmo ocorre com as lacunas que ficaram isoladas no lado p .
- A camada de depleção é uma espécie de “zona morta” onde não há espaço para movimentação de elétrons e lacunas.

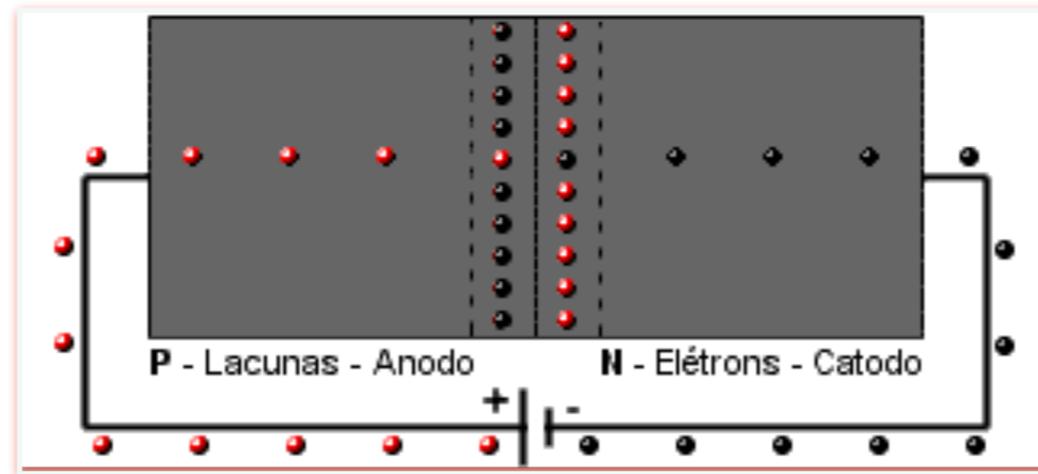
Funcionamento de um diodo



Funcionamento de um diodo

- Vamos agora submeter nosso diodo a uma tensão, gerada, por exemplo, por uma bateria externa.
- Conecta-se o terminal negativo (fluxo de elétrons) da bateria à porção n do diodo e o terminal positivo (fluxo de lacunas) à porção p .
- Desta forma, a região n , com excesso de elétrons, recebe ainda mais elétrons, e a porção p recebe ainda mais lacunas.

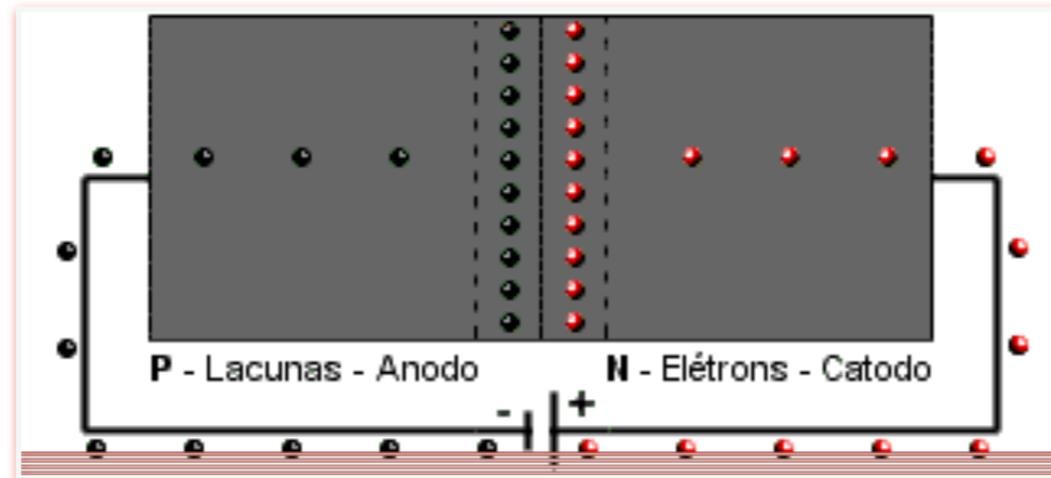
Funcionamento de um diodo



polarização direta

- Os elétrons do lado n recebem toda a energia do pólo negativo da fonte, ganhando força suficiente para expulsar os elétrons que estão alojados na camada de depleção
- Rompendo essa camada, eles encontram um terreno fértil em lacunas no lado p . Mas não param por aí: como eles são atraídos pelo pólo positivo da fonte, eles continuam a pular de lacuna em lacuna, abrindo espaço para que outros elétrons possam vir atrás deles
- Com esse movimento, forma-se uma corrente elétrica. O semicondutor passa a se comportar como um **condutor normal**.

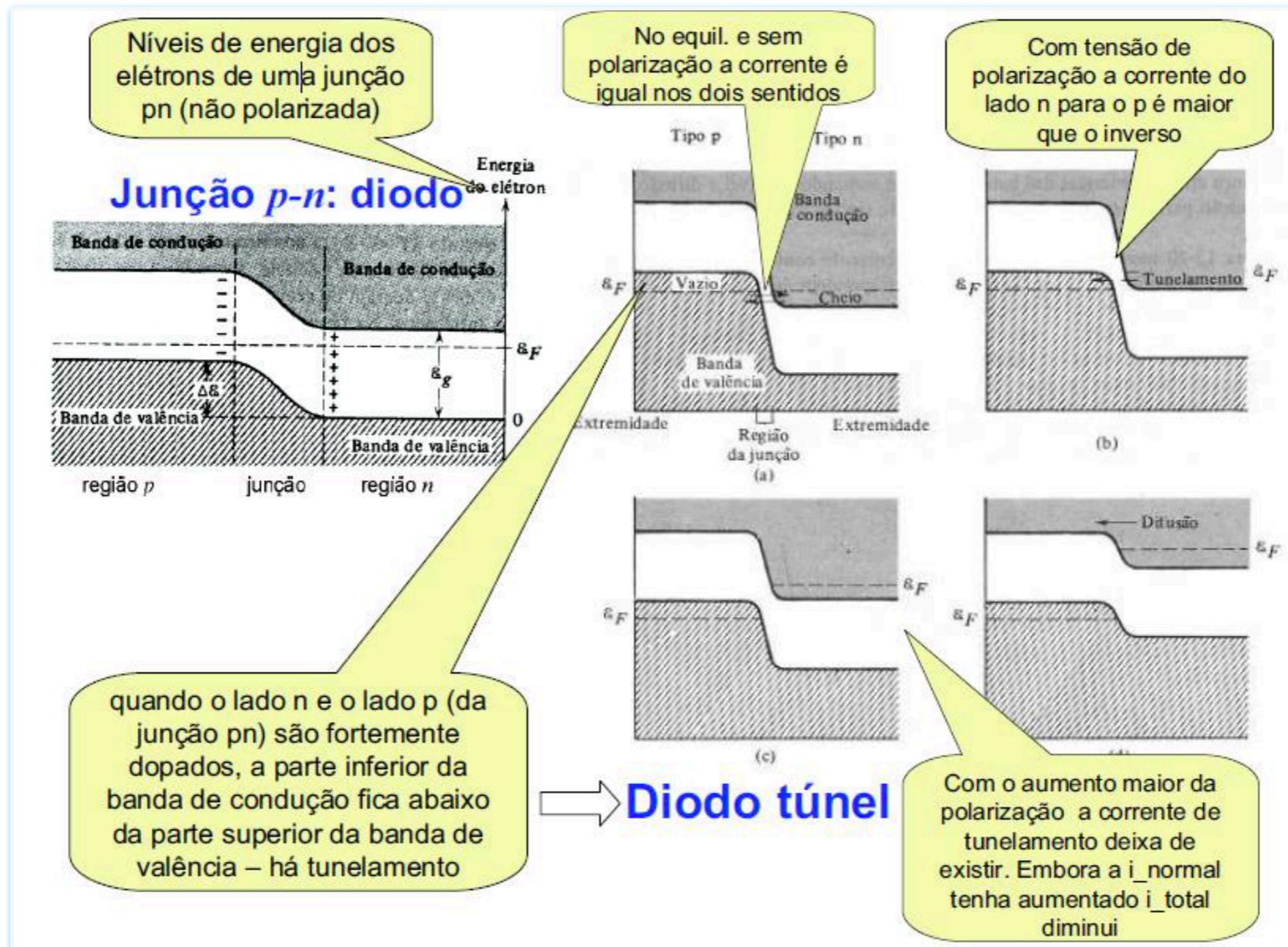
Funcionamento de um diodo



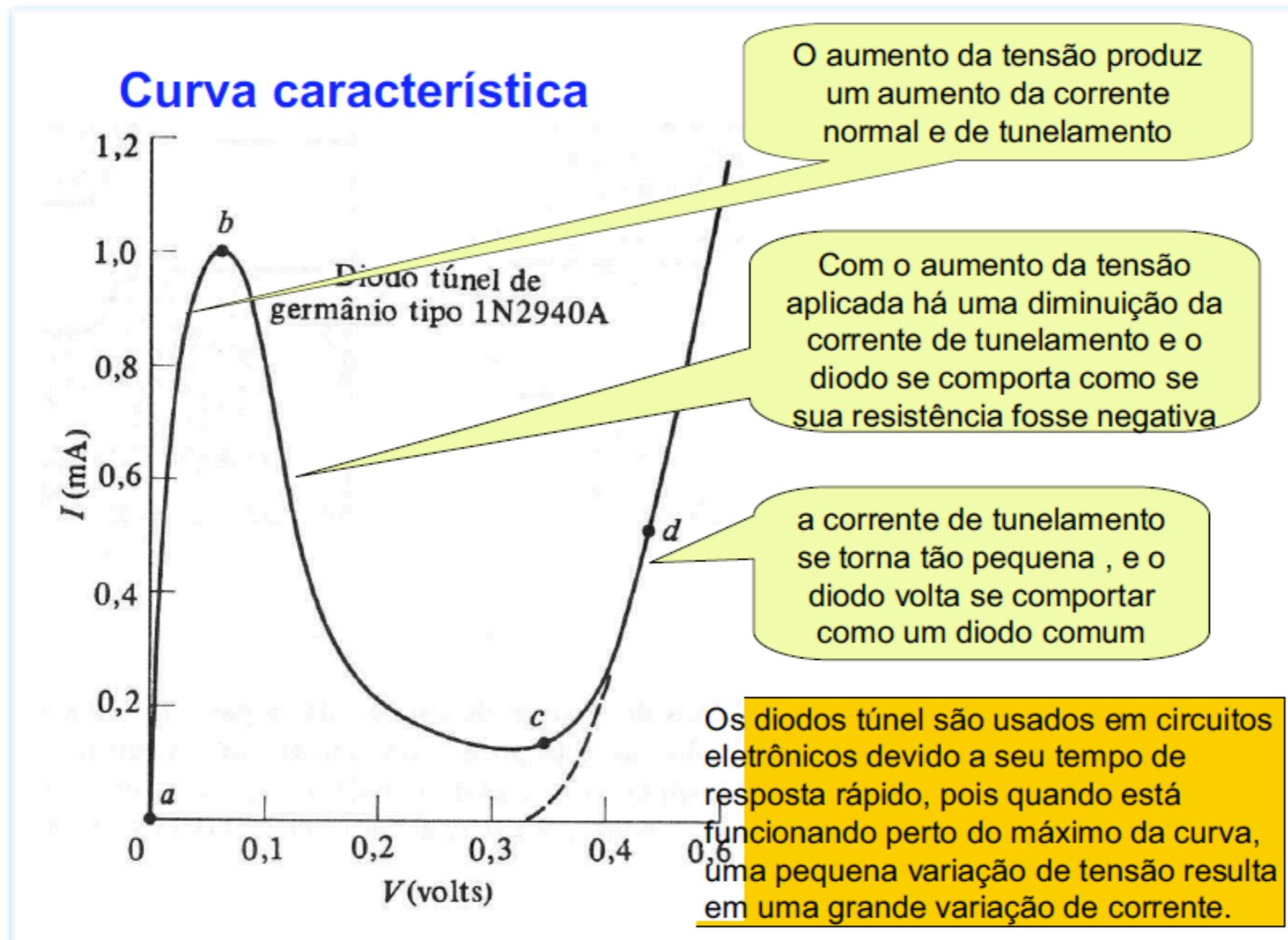
polarização inversa

- Vamos agora inverter a polaridade da bateria. Vamos conectar o terminal positivo da bateria à porção n do diodo e o terminal negativo à porção p .
- Desta forma, os elétrons da região n são atraídos pelas lacunas do pólo positivo da bateria e as lacunas da região p são completadas pelos elétrons do pólo negativo.
- A camada de depleção aumenta sensivelmente. Se ela já dificultava a passagem de corrente, agora torna-se virtualmente impossível transpô-la.
- Os portadores majoritários de cada lado ficam ainda mais isolados. O semicondutor passa a se comportar como um **isolante**.

Funcionamento de um diodo túnel



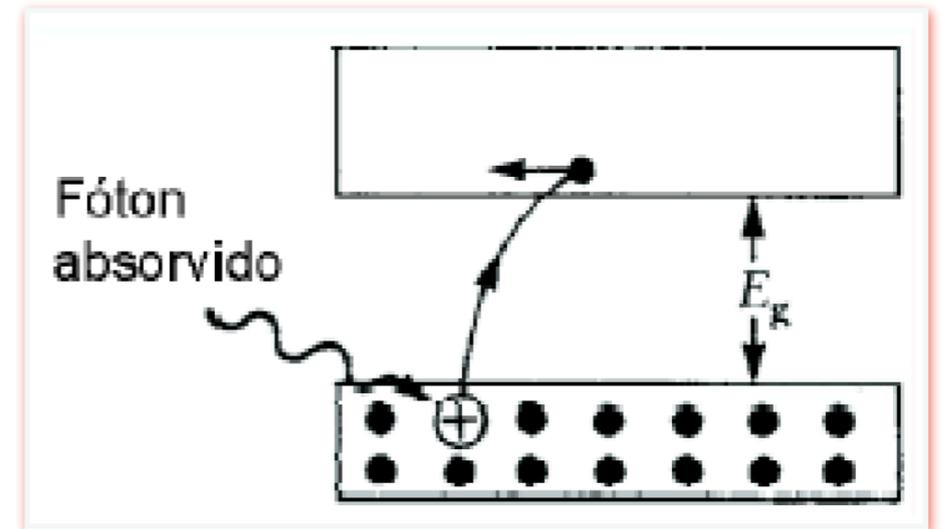
Funcionamento de um diodo túnel



Absorção e emissão de luz

- Absorção e emissão de luz por semicondutores são processos análogos àqueles que ocorrem em átomo isolados.
- A diferença é que os níveis atômicos são substituídos por bandas.
- Exemplo: [célula solar](#)

Absorção e emissão de luz



- Ela apresenta junções $p-n$.
- Um fóton de energia maior que a largura da banda proibida incide sobre a região p e transfere o elétron para a banda de condução deixando um buraco na banda de valência.
- Temos então um excesso de cargas positivas na região p e um excesso de cargas negativas na região n .
- Surge uma ddp $\sim (0.6 \text{ V})$ entre as regiões.

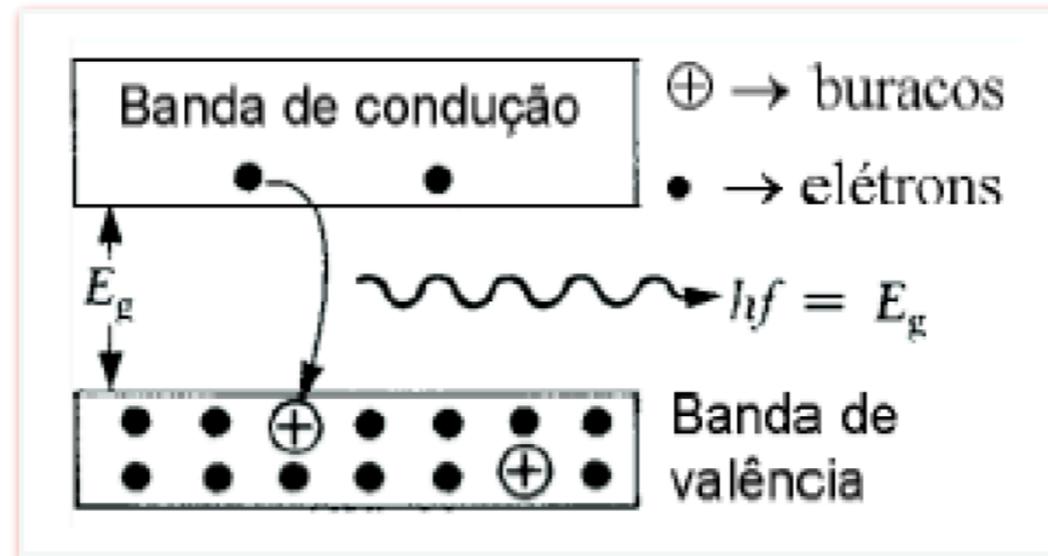
Absorção e emissão de luz

- Se uma resistência é ligada a estas regiões, temos corrente elétrica.
- Assim, parte da energia da luz incidente é transformada em energia elétrica.
- A corrente no resistor é proporcional ao número de fótons, que por sua vez, é proporcional a intensidade da luz incidente.

Absorção e emissão de luz

- O processo inverso ao da célula solar é o diodo **fotoemissor**.
- Um elétron de alta energia, ao atravessar o semicondutor cria muitos pares elétron-buraco.
- Assim, temos um pulso de corrente elétrica que registra a passagem da partícula.
- Quando a junção $p-n$ é polarizada diretamente, há uma corrente elevada e muitos elétrons se recombinam com os buracos para emitir fótons.

Absorção e emissão de luz

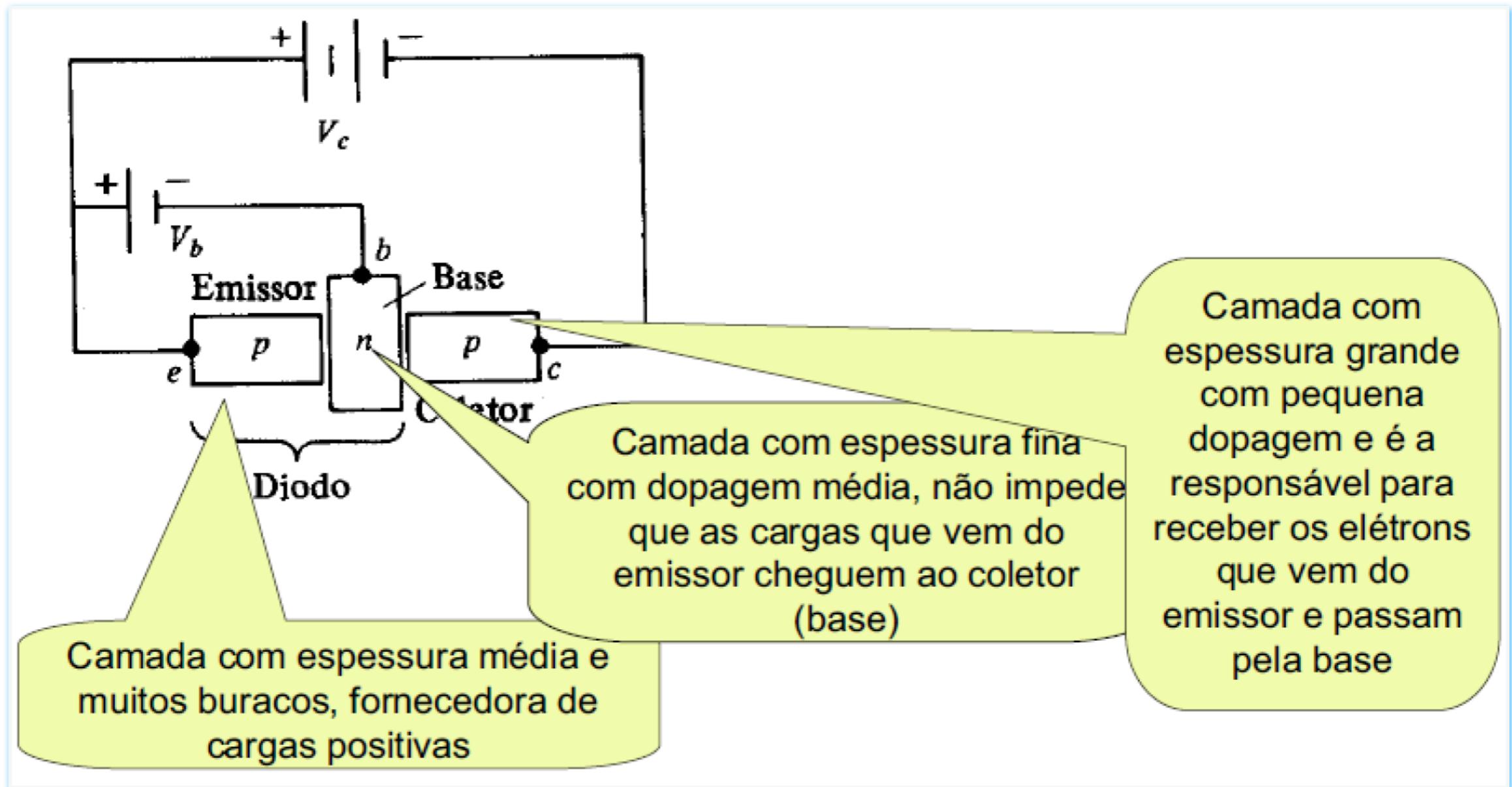


- Este é o princípio de funcionamento do **LED** (*light emitting diode*, diodo emissor de luz).
- O princípio de funcionamento do laser semicondutor é o mesmo do LED.

Transistor

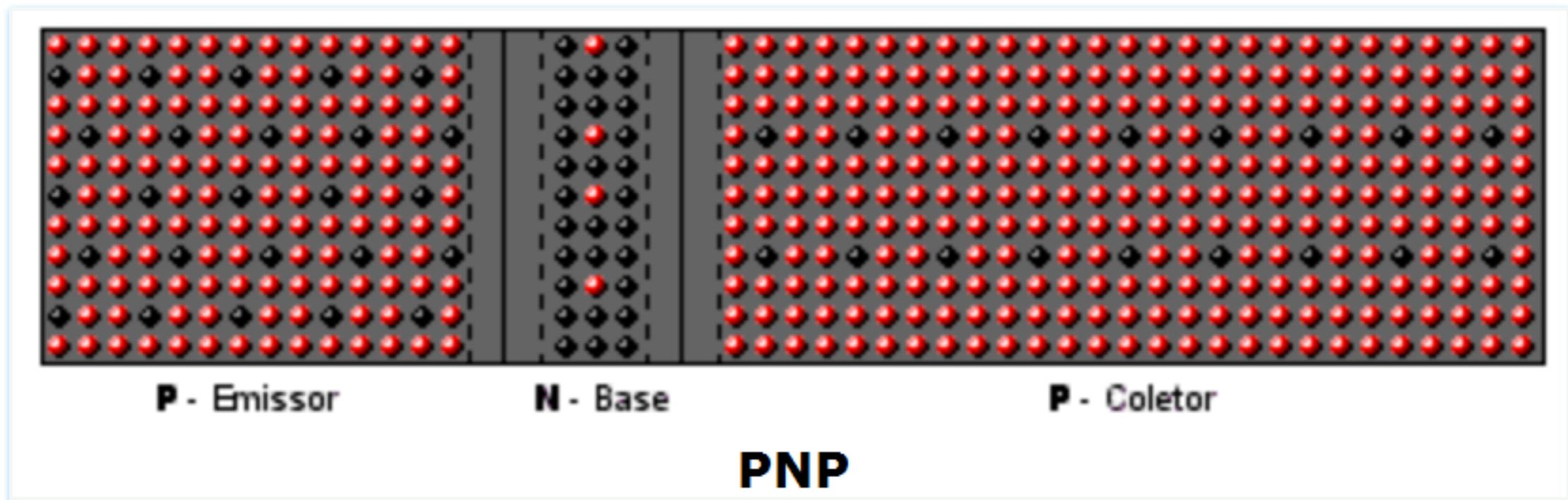
- O transistor funciona como um amplificador de sinal.
- Quando o diodo é polarizado diretamente, ele conduz eletricidade.
- Com o transistor temos a capacidade de controlar quanto dela é conduzida.

Transistor

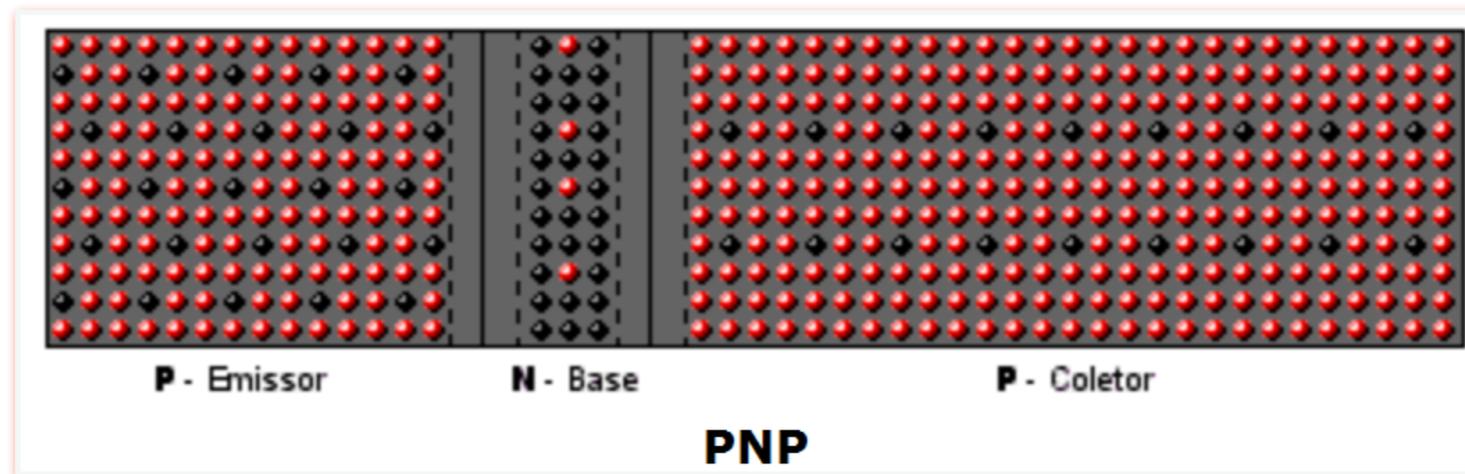


Transistor

- Acrescentamos uma camada adicional ao diodo.
- Ao invés de duas porções p e n (de silício), juntamos três camadas fazendo um sanduíche da porção n .

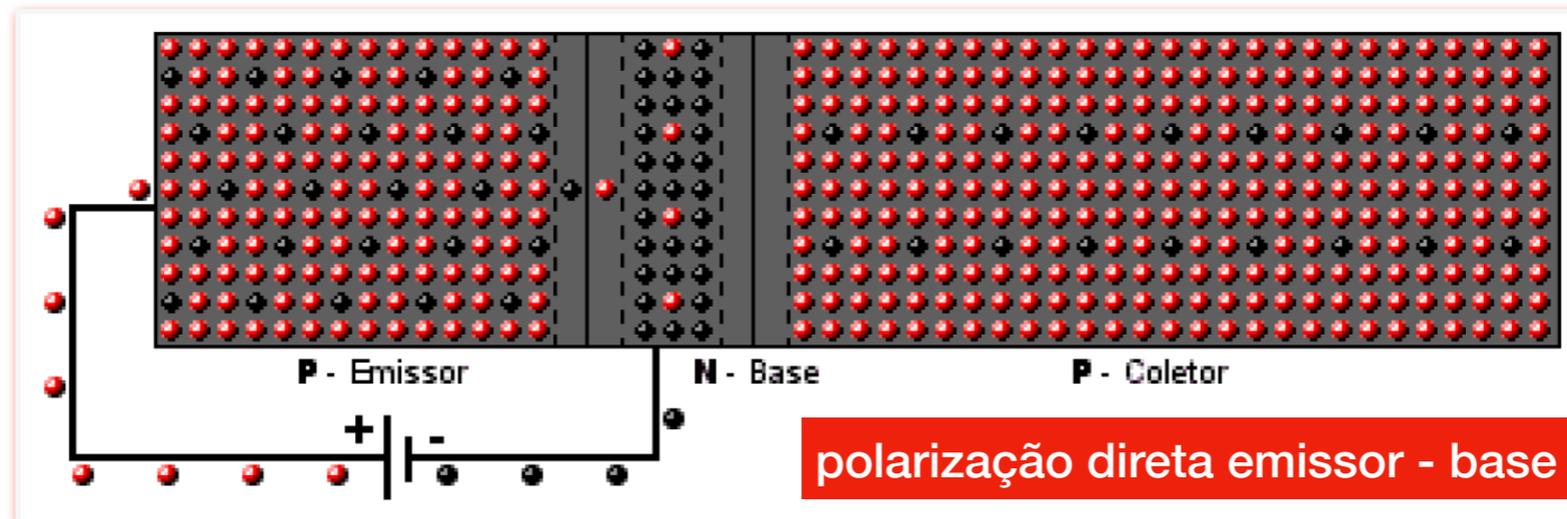


Transistor



- A primeira camada p (esquerda) tem largura média e é fortemente dopada, ou seja, tem muitos átomos trivalentes. Isso torna esta camada um fornecedor de lacunas (cargas positivas). Ela é chamada de **emissor**.
- A camada central n é muito fina e tem uma dopagem média. Como ela é fina, não representa um empecilho muito grande para as cargas que vêm do emissor. Esta é a camada **base**.
- A camada da direita é bastante larga em relação às demais e é fracamente dopada. Por ser responsável por receber os elétrons que saem do emissor e atravessam a base, é chamada de **coletor**.

Transistor

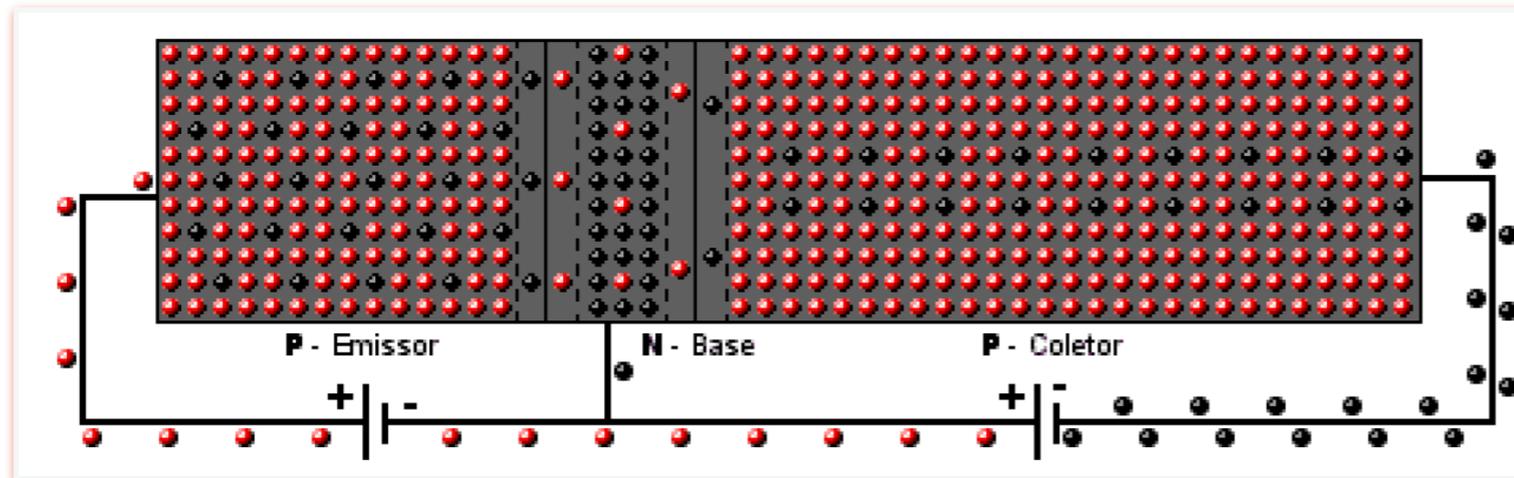


- Vamos colocar uma bateria entre o emissor e a base.
- Para fazer uma polarização direta, ligamos o terminal negativo (fluxo de elétrons) da bateria à base (porção n - excesso de elétrons) e o terminal positivo (fluxo de lacunas) ao emissor (porção p - excesso de lacunas)
- Desta forma, a região n , com excesso de elétrons, recebe ainda mais elétrons, e a porção p recebe ainda mais lacunas.
- Como vimos no caso do diodo, a polarização direta faz com que a porção emissor-base se comporte exatamente como um condutor.

Transistor

- Agora, ao mesmo tempo, vamos polarizar inversamente o conjunto base-coletor.
- Para isso, conectamos o terminal positivo (fluxo de lacunas) da bateria à base (porção n - excesso de elétrons) e o terminal negativo (fluxo de elétrons) ao coletor (porção p - excesso de lacunas).
- Desta forma, os elétrons do coletor serão atraídos pelas lacunas do pólo positivo da bateria e as lacunas da base serão completadas pelos elétrons do pólo negativo.
- Como também vimos no caso do diodo, essa polarização inversa faz com que a porção base-coletor não conduza corrente.

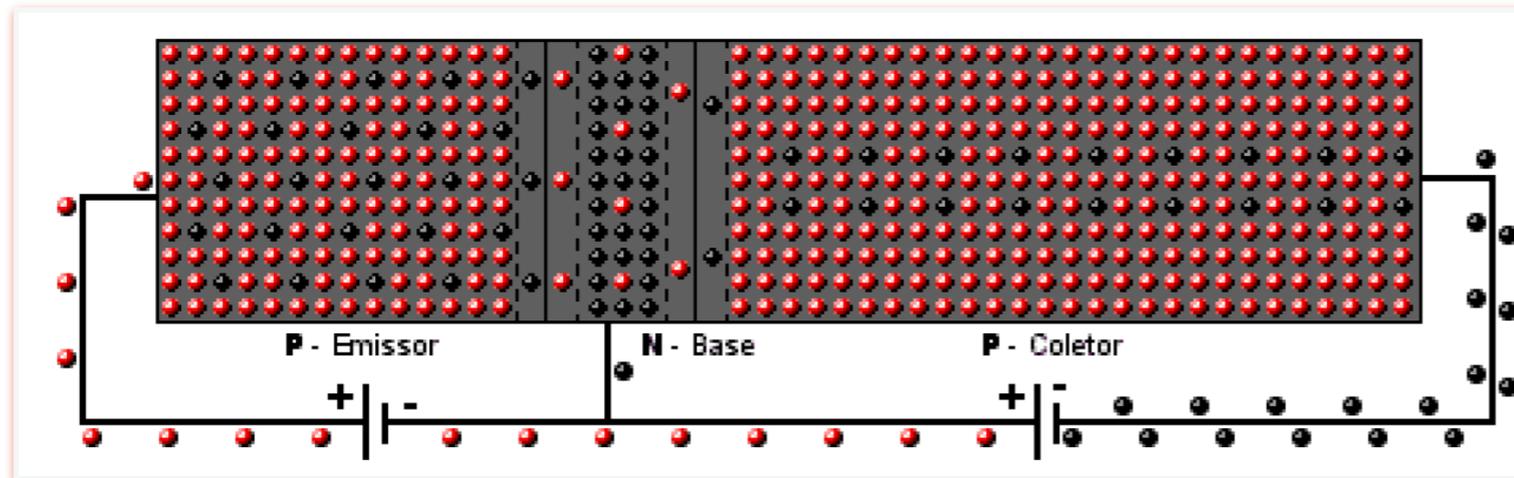
Transistor



polarização simultânea

- Na polarização emissor-base, os elétrons se dirigem para a base, atraídos pelo pólo positivo da bateria.
- Mas agora o coletor, que é bem maior e está com energia extra vinda do pólo negativo da bateria, exerce uma atração muito maior sobre esses elétrons.
- Como a base é muito fina, os elétrons tendem muito mais a atravessar a base e ir para o coletor do que fluir pela base para o pólo positivo da bateria.
- Desta forma, uma pequena parte da corrente fluirá pela base; a maior parte da corrente fluirá para o coletor. Temos aí uma amplificação da corrente.

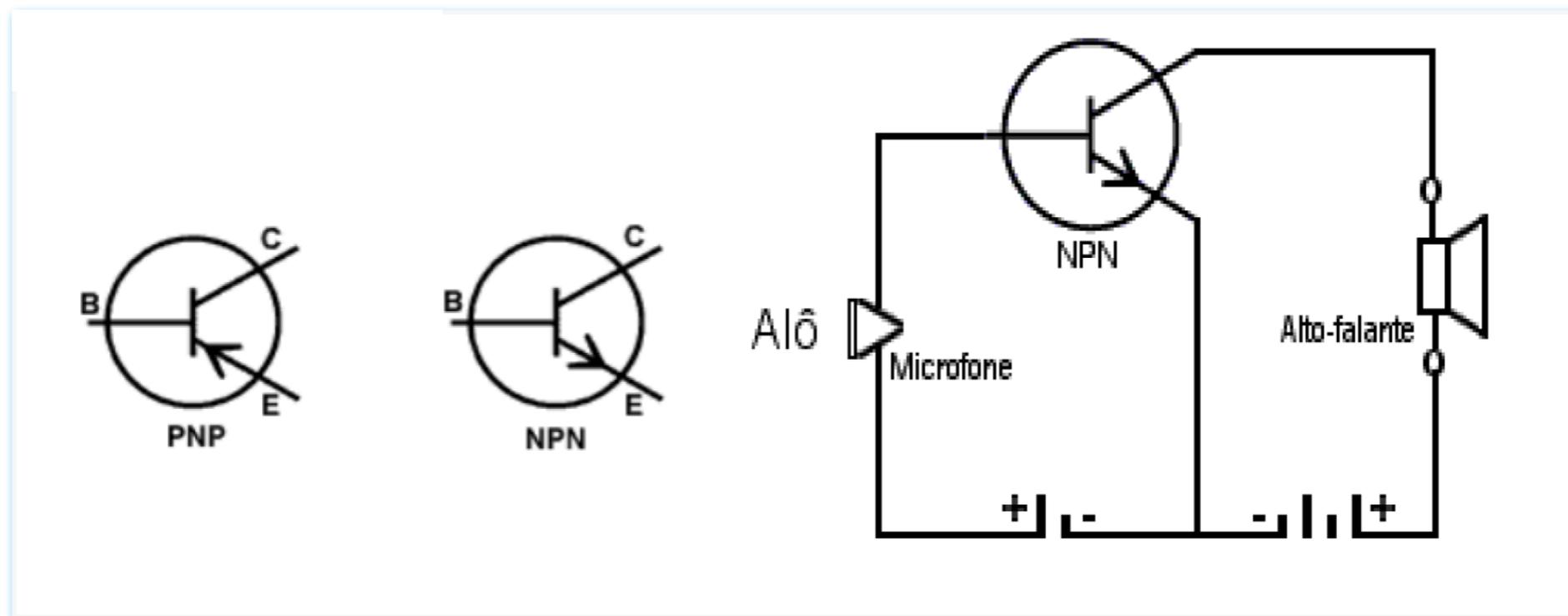
Transistor



polarização simultânea

- Se aumentarmos a corrente que flui pela base (emissor-base), haverá um aumento na corrente que flui pelo coletor. Ou seja, podemos controlar a corrente vinda do emissor para o coletor agindo sobre a corrente da base. Noutras palavras: a corrente da base controla a corrente entre o emissor e o coletor.
- Como a corrente da base é muito pequena, basta aplicarmos uma pequena variação na corrente da base para obtermos uma grande variação na corrente do coletor. Pronto: entramos com uma pequena corrente (via base) e saímos com uma grande corrente (via coletor).

Transistor



Amplificação

