

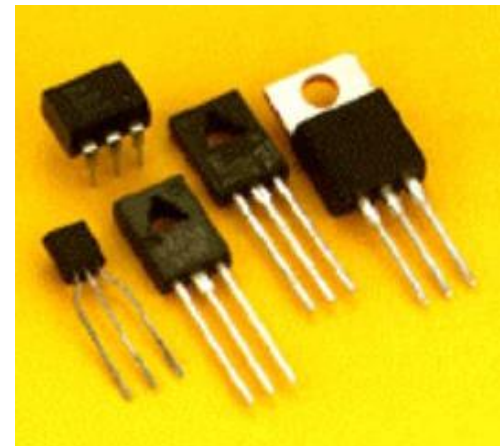
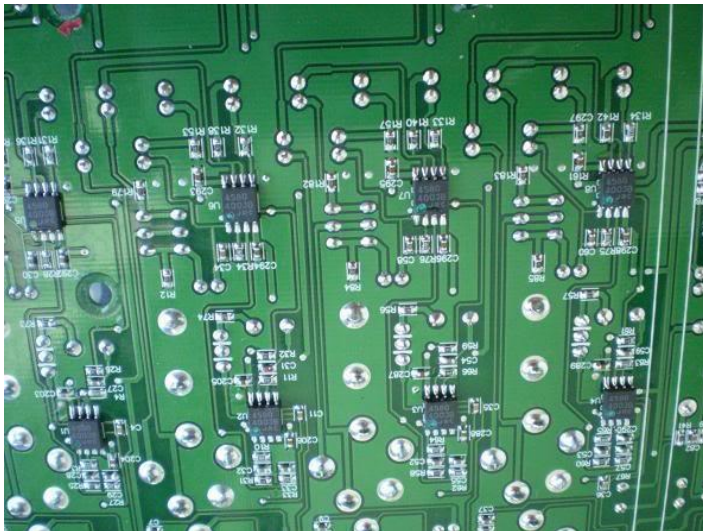
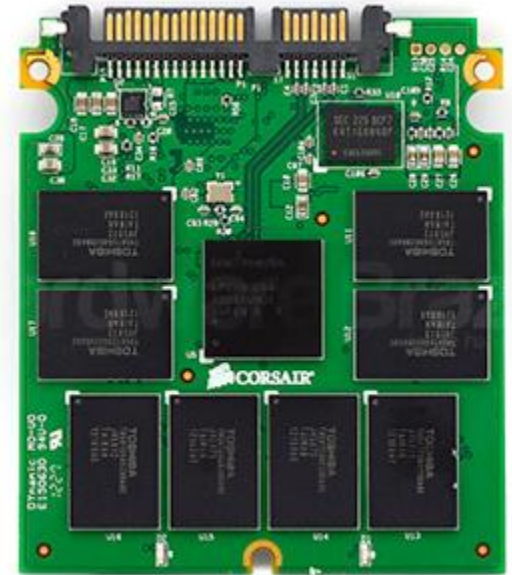
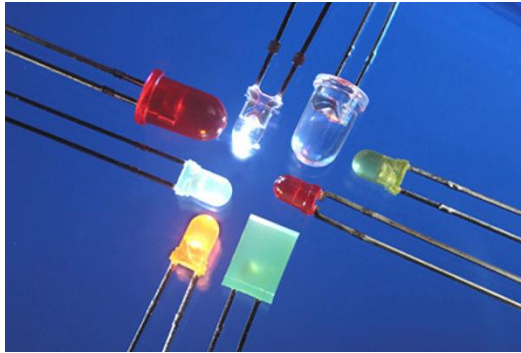
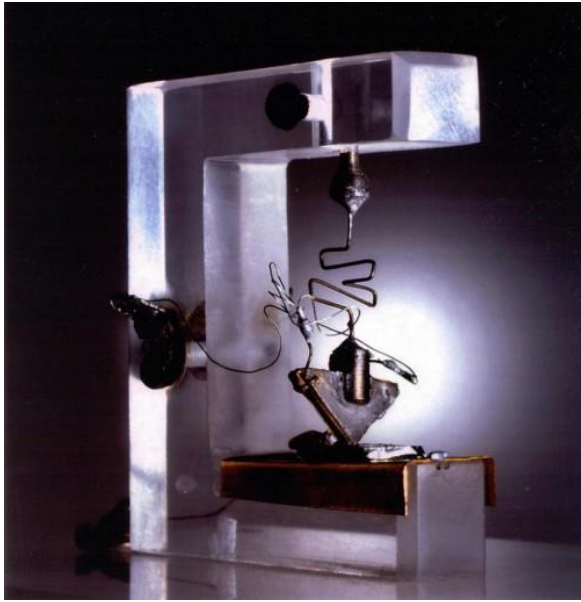
# ***MATERIAIS SEMICONDUCTORES***



# Conteúdo

---

- Evolução tecnológica
- Resistividade
- Semicondutores, condutores e isolantes
- Silício e Germânio
- Modelo atômico e estados energéticos
- Dopagem e semicondutores intrínsecos e extrínsecos
- Semicondutores tipo P e tipo N





# Lei de Moore

## Intel's Relentless Pursuit of Moore's Law

180 nm  
1999

130 nm  
2001

90 nm  
2003

65 nm  
2005

45 nm  
2007

32 nm  
2009

Top  
Secret

22 nm  
2011



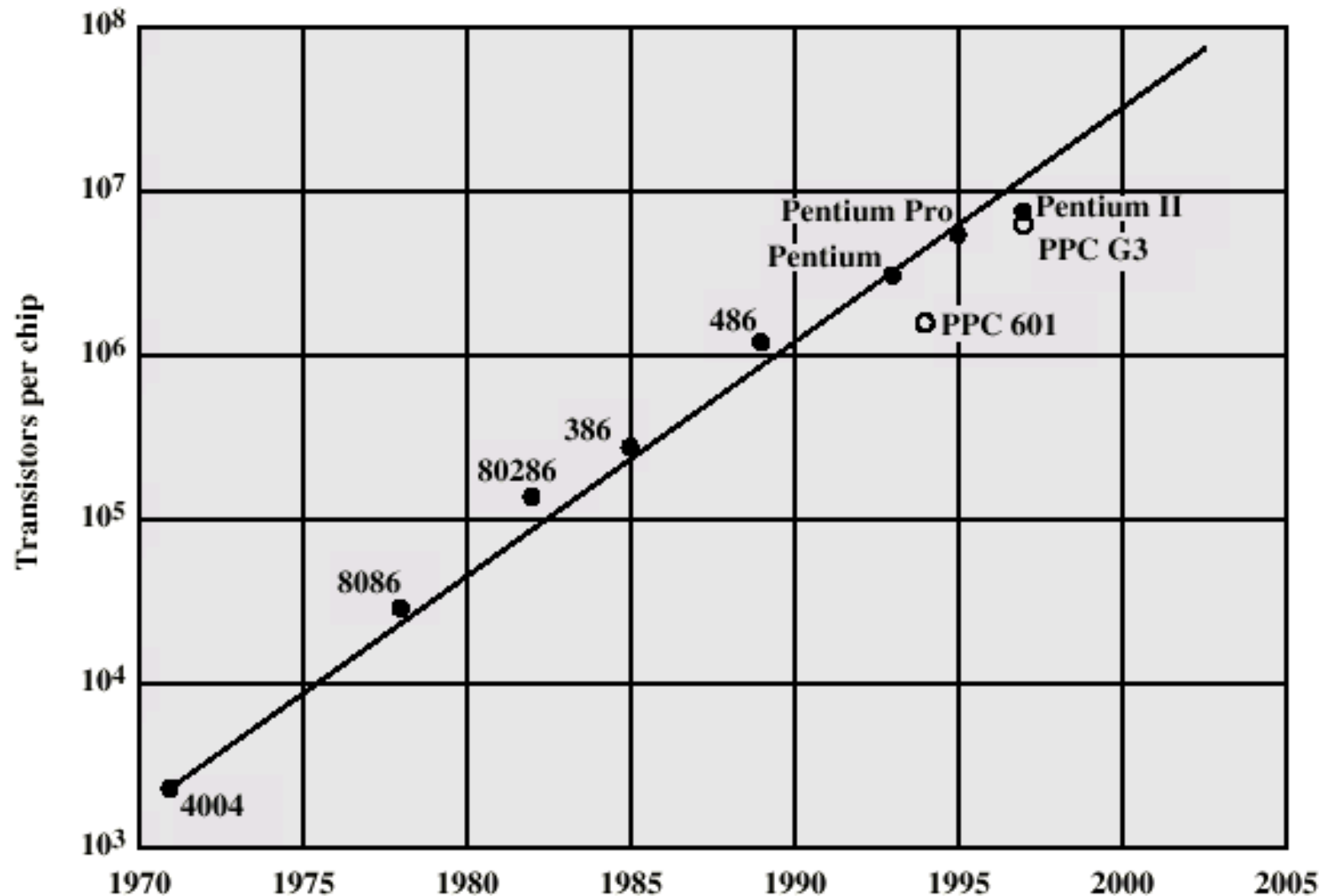
# Lei de Moore

“Reduced cost is one of the big attractions of integrated electronics, and the cost advantage continues to increase as the technology evolves toward the production of larger and larger circuit functions on a single semiconductor substrate.”  
Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965.

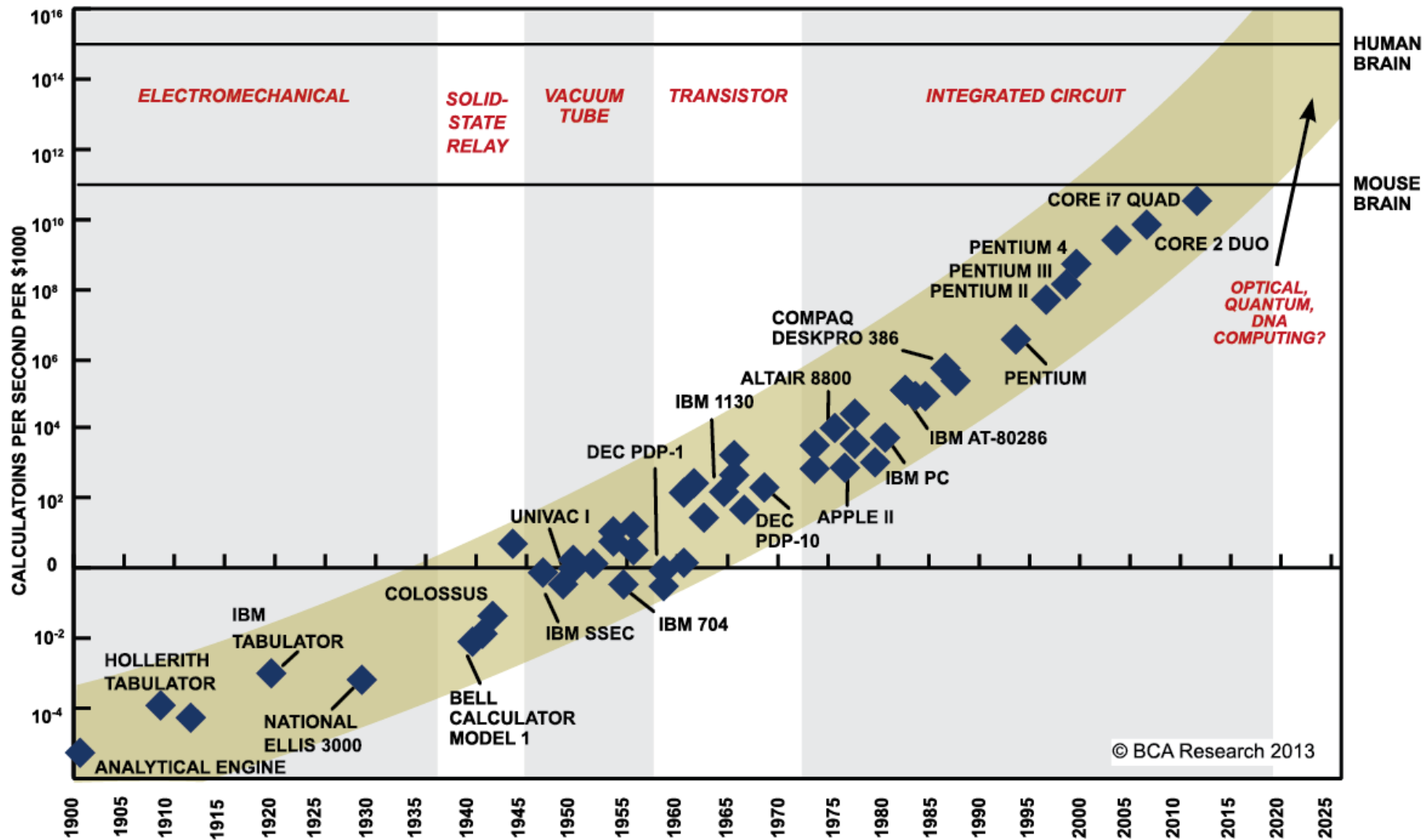
# Lei de Moore

- Aumento da densidade de componentes por chip
- Gordon Moore – um dos fundadores da Intel
- O número de transistores em um chip *dobrará a cada ano*
- Desde os anos 1970 a taxa de crescimento tem diminuído um pouco
  - O número de transistores dobra a cada 18 meses
- O custo de um chip tem se mantido praticamente constante

# Crescimento do Número de Transistores na CPU



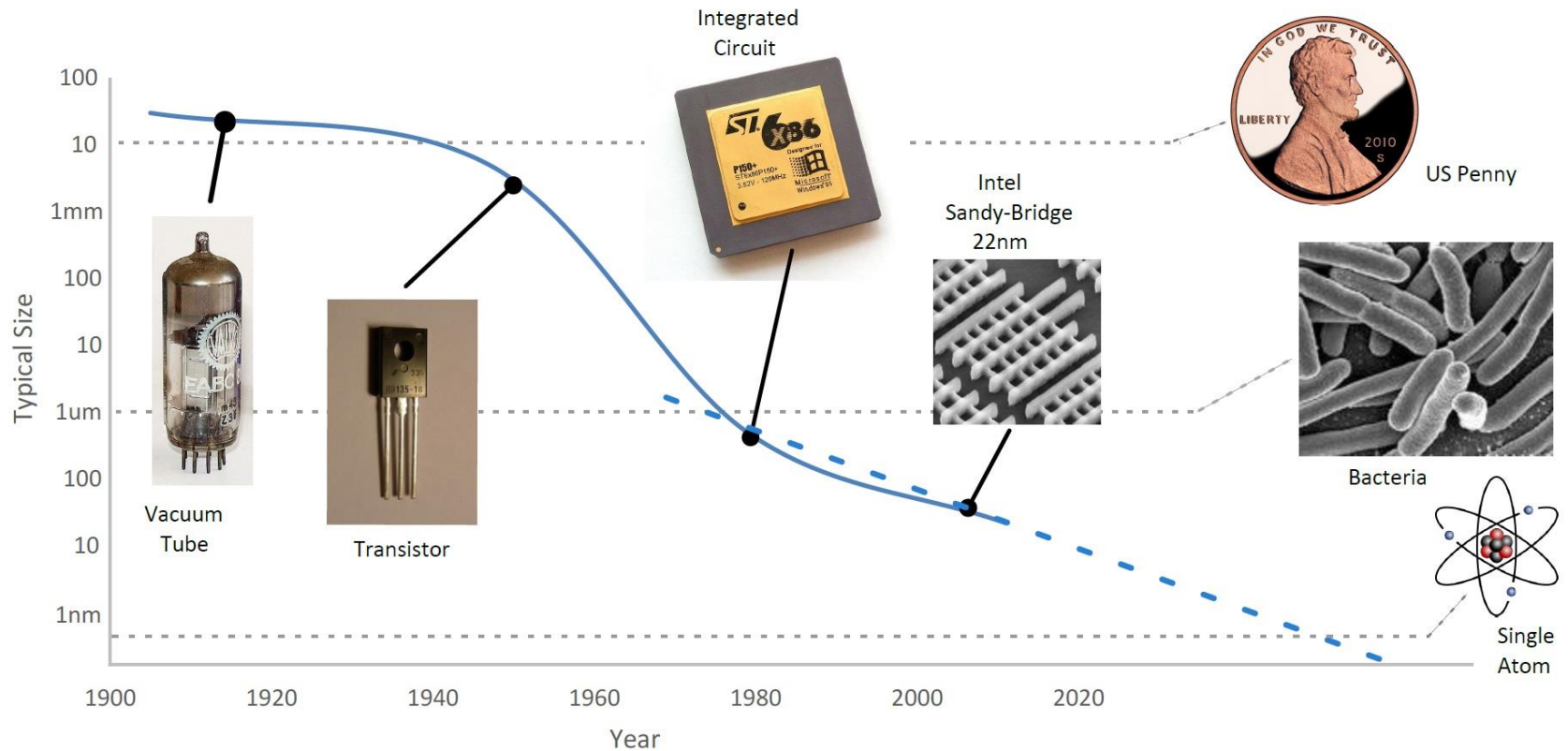
# Desempenho



SOURCE: RAY KURZWEIL, "THE SINGULARITY IS NEAR: WHEN HUMANS TRANSCEND BIOLOGY", P.67, THE VIKING PRESS, 2006. DATAPPOINTS BETWEEN 2000 AND 2012 REPRESENT BCA ESTIMATES.



# Evolução

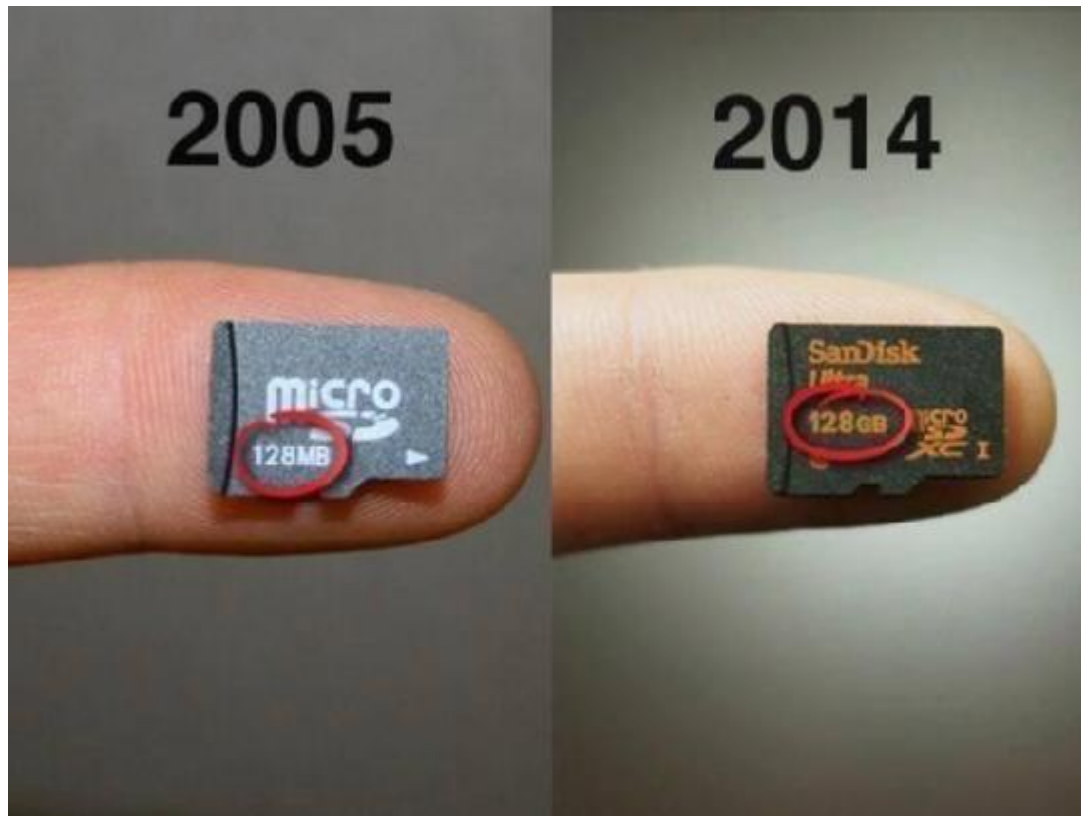


# Lei de Moore

## ...consequências

- Maior densidade de dispositivos implica caminhos elétricos mais curtos e maior desempenho
- Menor tamanho aumenta a flexibilidade
- Menor potência e menos necessidade de sistemas de resfriamento
- Menos interconexões implicam maior confiabilidade

# Lei de Moore ...consequências



# Lei de Moore ...consequências



# Lei de Moore ...como estamos atualmente?



“We are now a factor of 15 behind where we should be if Moore’s Law were still operative. We are in the post–Moore’s Law era.”

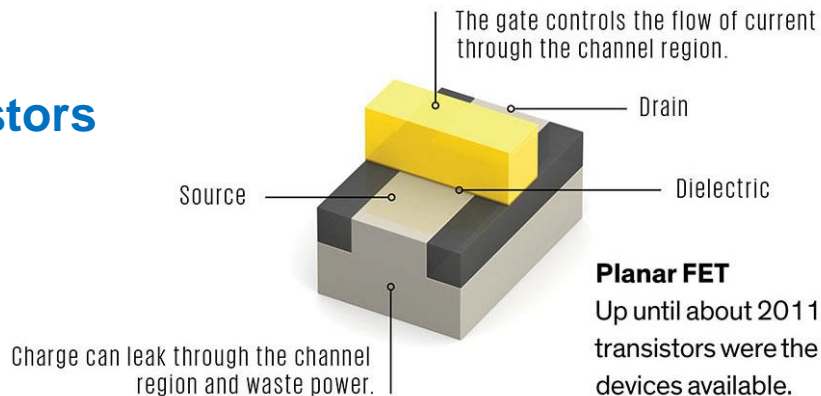
David Patterson—University of California professor, Google engineer, and RISC pioneer—says there’s no better time than now to be a computer architect. 2018.



# Lei de Moore

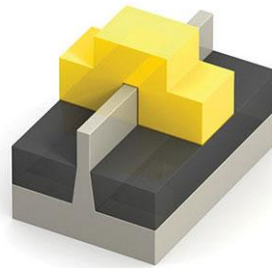
## ...como estamos atualmente?

### Nanosheet field-effect transistors



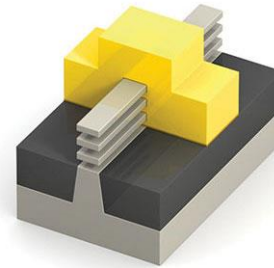
#### Planar FET

Up until about 2011, planar transistors were the best devices available.



#### FinFET

Surrounding the channel region on three sides with the gate gives better control and prevents current leakage.



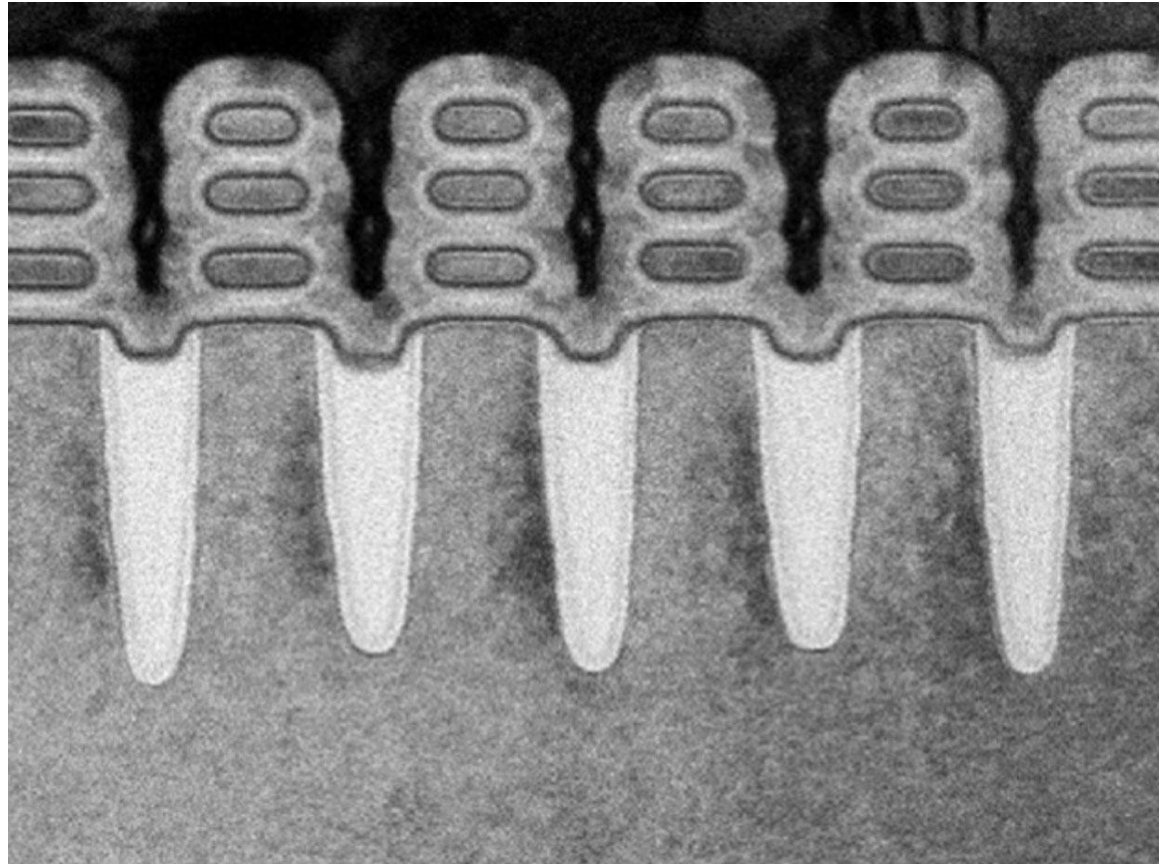
#### Stacked nanosheet FET

The gate completely surrounds the channel regions to give even better control than the FinFET.

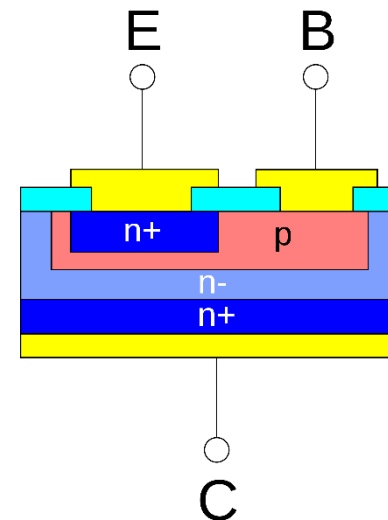
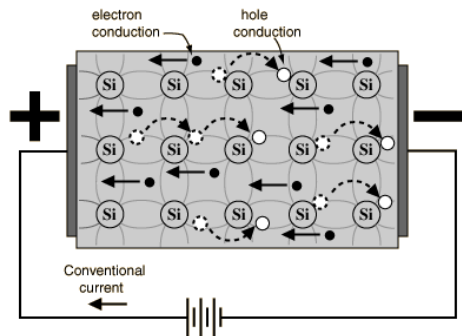
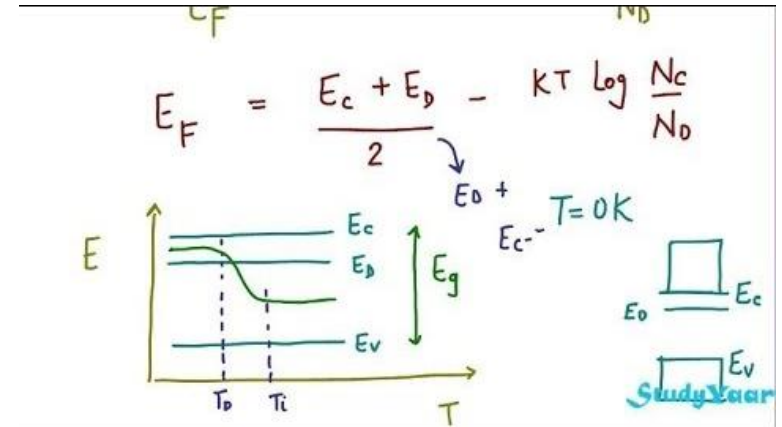
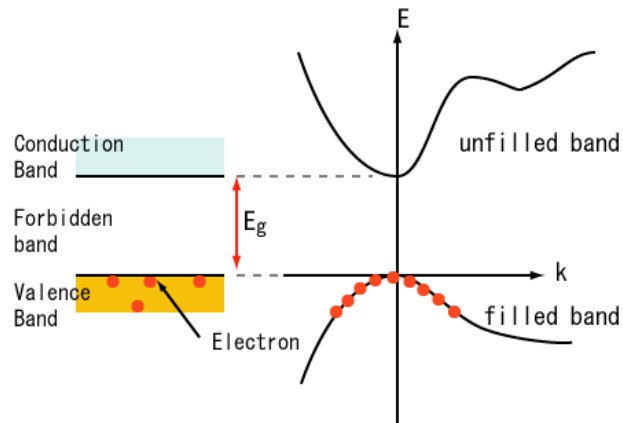
# Lei de Moore

## ...como estamos atualmente?

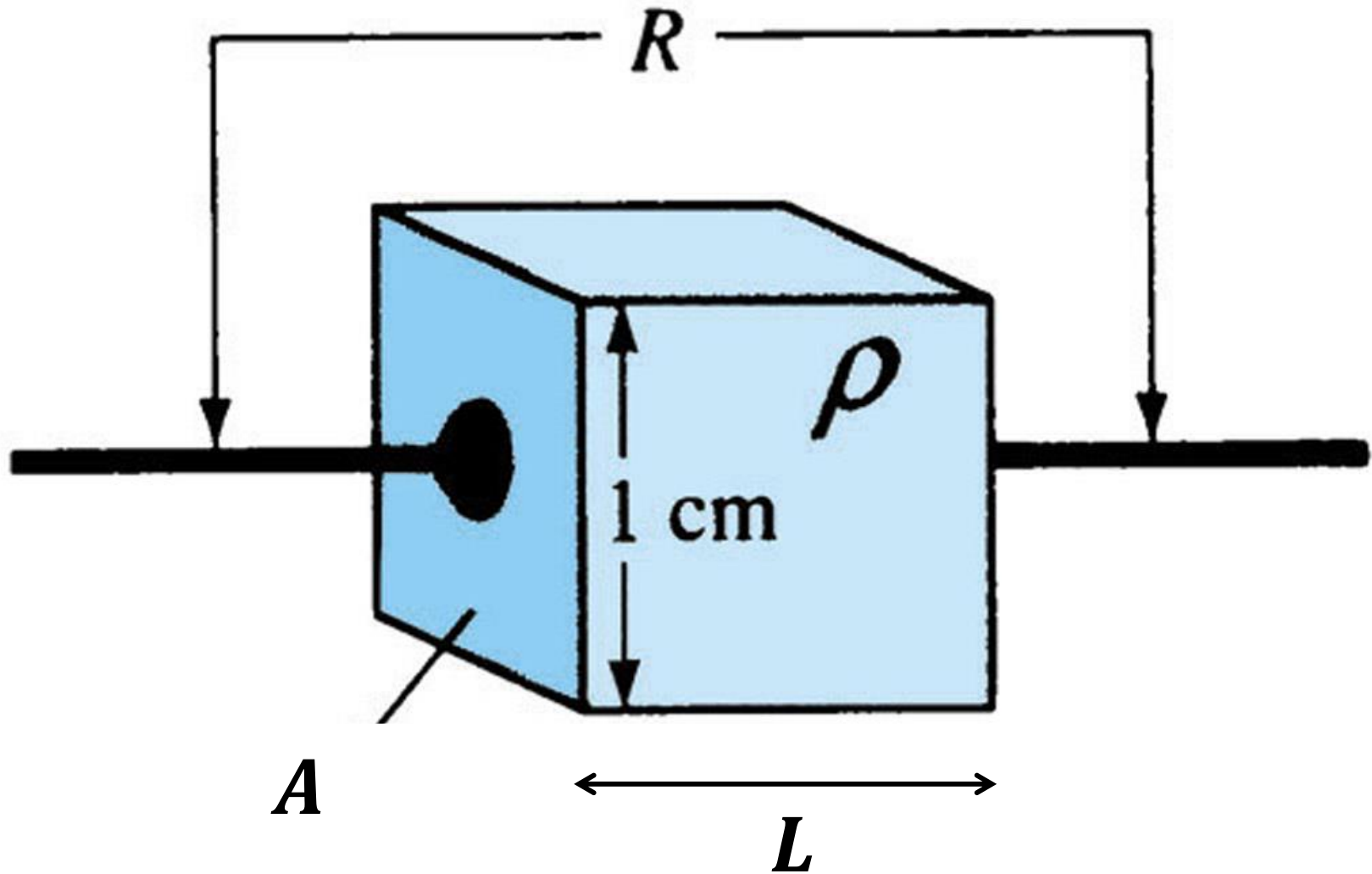
3-nanometer



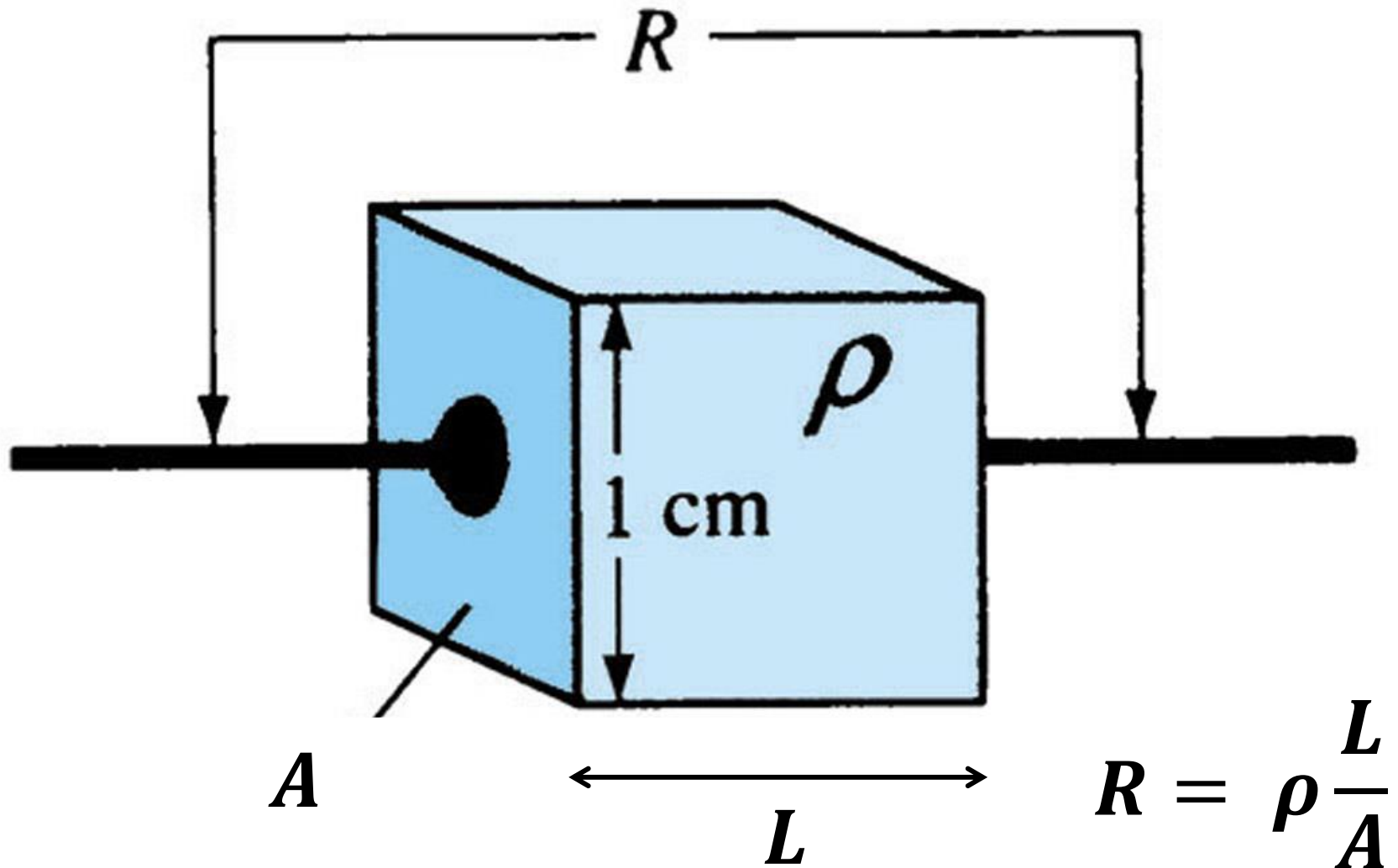
# Semicondutores – Teoria?



# Resistividade (ou Resistência Específica)



# Resistência



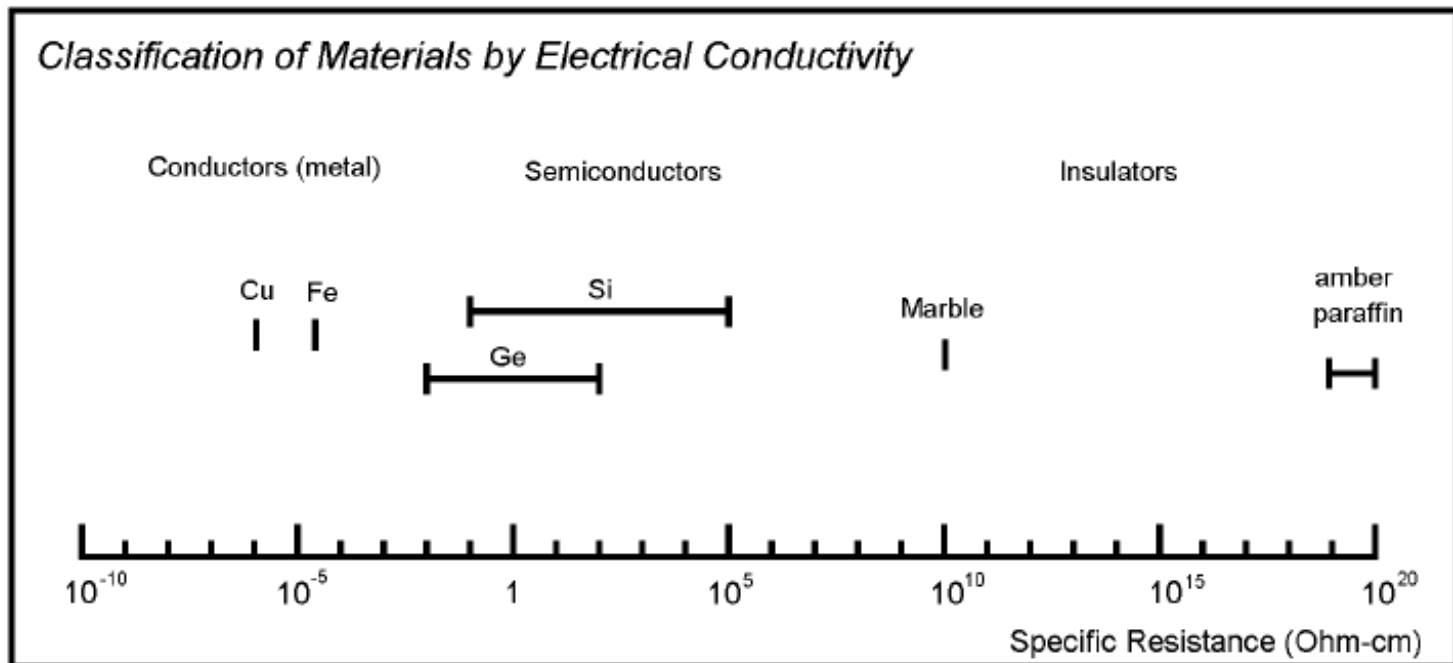


# Isolantes, Semicondutores e Metais

- Isolante – é um condutor “muito pobre” de eletricidade;
- Metal – é um excelente condutor elétrico;
- Semicondutor – possui condutividade entre os dois extremos acima.

# Semicondutores

→ O material básico utilizado na construção de dispositivos eletrônicos, em estado natural, não é um bom **condutor**, nem um bom **isolante**.



# Silício e o Germânio

- O **silício** e o **germânio** são muito utilizados na construção de dispositivos eletrônicos.
- O **silício** é o mais utilizado, devido ao fato de que suas *características* são melhores em comparação ao germânio e também por ser mais **abundante** na face da terra.

# Características

- Físicas
  - Estrutura cristalina
  - Resistividade
  - Forma
- Químicas
  - Estrutura atômica
  - Ligações covalentes
- Disponibilidade
  - Custo

# Temperatura, Luz e Impurezas

- Em comparação com os metais e os isolantes, as propriedades elétricas dos semicondutores **são mais fortemente afetadas** por variação de temperatura, exposição a luz e acréscimos de impurezas.



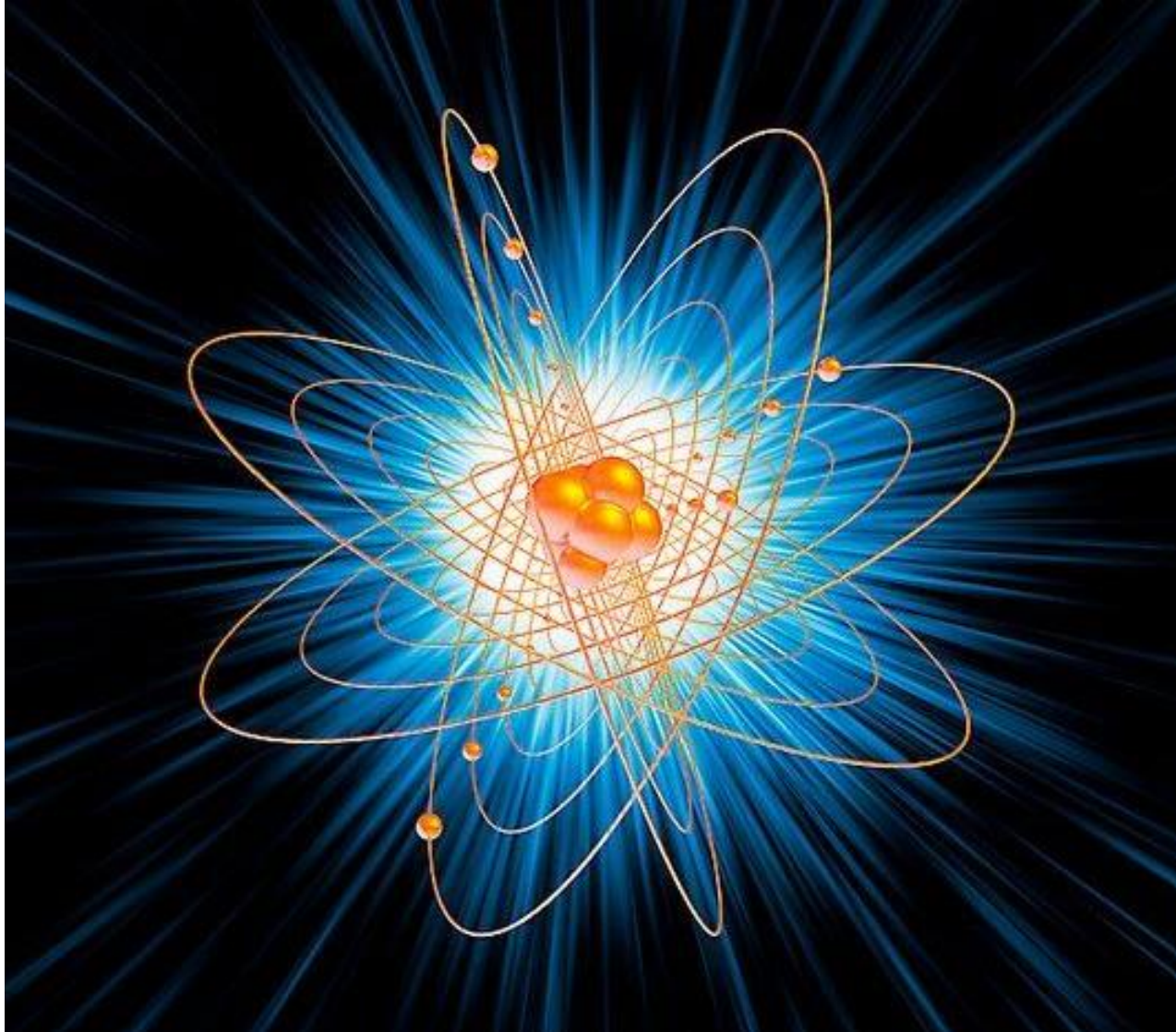


**Estrutura Atômica**

# Modelo Atômico De Bohr

- **O átomo** - é constituído por partículas elementares, as mais importantes para o nosso estudo são os elétrons, os prótons e os nêutrons.
- **Camada de Valência** - A última camada eletrônica (nível energético) é chamada camada de valência. O **silício** e o **germânio** são átomos tetravalentes, pois possuem **quatro** elétrons na camada de valência.

# Modelo atômico

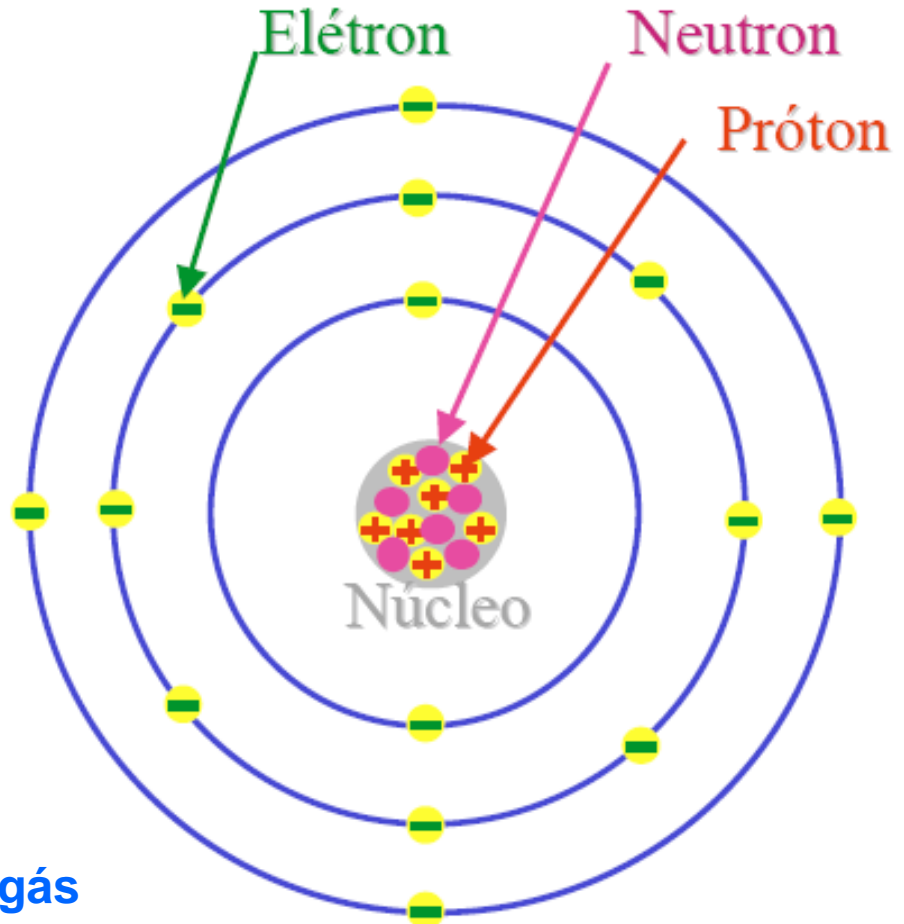


# Átomo de silício

## Átomo de Silício

- Grande estabilidade física e química
- 4 elétrons na órbita externa: valência = 4
- Permite uma obtenção “natural” do óxido de silício  $\text{SiO}_2$

Para conseguir a configuração de gás nobre necessita de mais 4 elétrons para a sua estabilidade.



# Silício

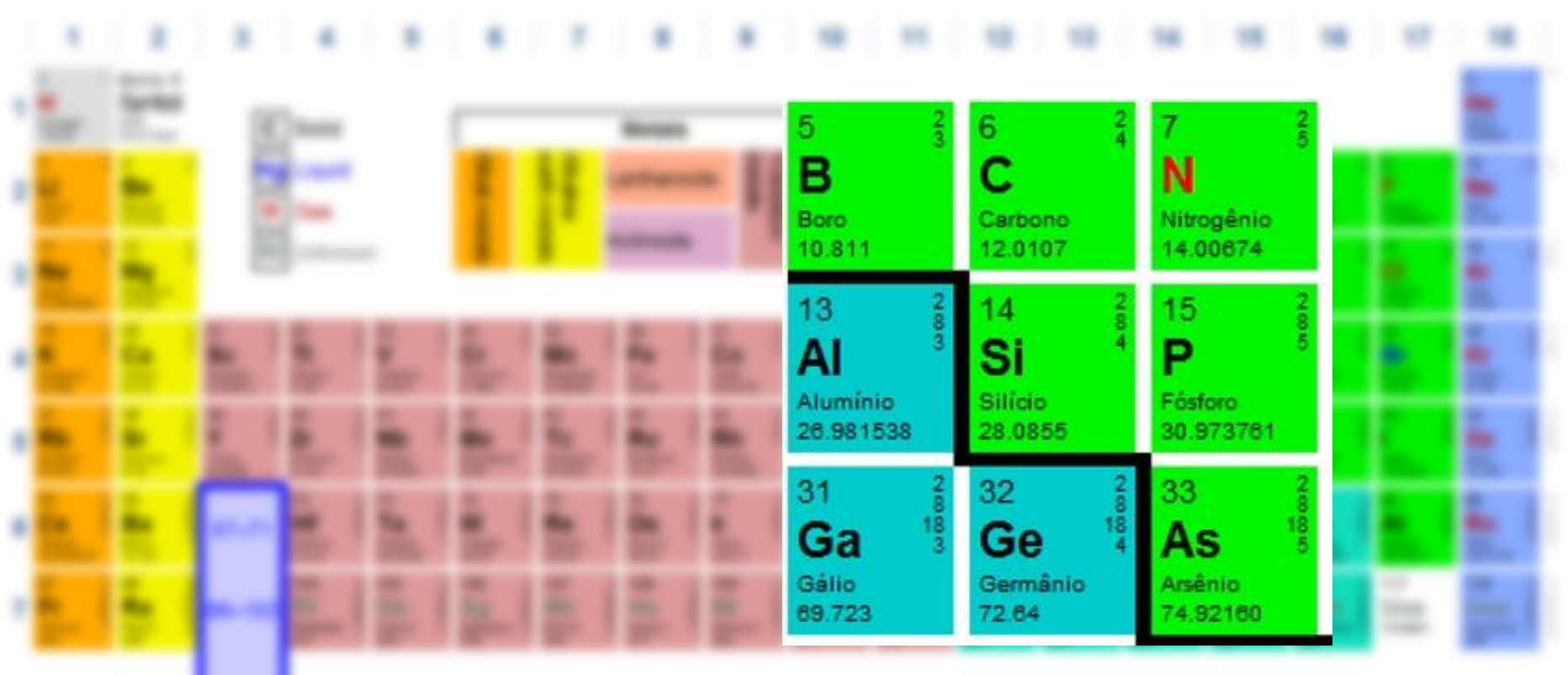
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	1 <b>H</b> Hydrogen 1.00794																	2 <b>He</b> Helium 4.002602	K
1																			
2	3 <b>Li</b> Lithium 6.941	4 <b>Be</b> Beryllium 9.012182																	
3	11 <b>Na</b> Sodium 22.98976928	12 <b>Mg</b> Magnesium 24.3050																	
4	19 <b>K</b> Potassium 39.0983	20 <b>Ca</b> Calcium 40.078	21 <b>Sc</b> Scandium 44.955912	22 <b>Ti</b> Titanium 47.867	23 <b>V</b> Vanadium 50.9415	24 <b>Cr</b> Chromium 51.9961	25 <b>Mn</b> Manganese 54.938045	26 <b>Fe</b> Iron 55.845	27 <b>Co</b> Cobalt 58.933195	28 <b>Ni</b> Nickel 58.6934	29 <b>Cu</b> Copper 63.546	30 <b>Zn</b> Zinc 65.38	31 <b>Ga</b> Gallium 69.723	32 <b>Ge</b> Germanium 72.64	33 <b>As</b> Arsenic 74.92160	34 <b>Se</b> Selenium 78.96	35 <b>Br</b> Bromine 79.904	36 <b>Kr</b> Krypton 83.798	
5	37 <b>Rb</b> Rubidium 85.4678	38 <b>Sr</b> Strontium 87.62	39 <b>Y</b> Yttrium 88.90585	40 <b>Zr</b> Zirconium 91.224	41 <b>Nb</b> Niobium 92.90638	42 <b>Mo</b> Molybdenum 95.96	43 <b>Tc</b> Technetium (97.9072)	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101.07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102.90550	46 <b>Pd</b> Palladium 106.42	47 <b>Ag</b> Silver 107.8682	48 <b>Cd</b> Cadmium 112.411	49 <b>In</b> Indium 114.818	50 <b>Sn</b> Tin 118.710	51 <b>Sb</b> Antimony 121.760	52 <b>Te</b> Tellurium 127.60	53 <b>I</b> Iodine 126.90447	54 <b>Xe</b> Xenon 131.293	
6	55 <b>Cs</b> Caesium 132.9054519	56 <b>Ba</b> Barium 137.327	57–71	72 <b>Hf</b> Hafnium 178.49	73 <b>Ta</b> Tantalum 180.94788	74 <b>W</b> Tungsten 183.84	75 <b>Re</b> Rhenium 186.207	76 <b>Os</b> Osmium 190.23	77 <b>Ir</b> Iridium 192.217	78 <b>Pt</b> Platinum 195.084	79 <b>Au</b> Gold 196.966569	80 <b>Hg</b> Mercury 200.59	81 <b>Tl</b> Thallium 204.3833	82 <b>Pb</b> Lead 207.2	83 <b>Bi</b> Bismuth 208.98040	84 <b>Po</b> Polonium (208.9824)	85 <b>At</b> Astatine (209.9871)	86 <b>Rn</b> Radon (222.0176)	
7	87 <b>Fr</b> Francium (223)	88 <b>Ra</b> Radium (226)	89–103	104 <b>Rf</b> Rutherfordium (261)	105 <b>Db</b> Dubnium (262)	106 <b>Sg</b> Seaborgium (266)	107 <b>Bh</b> Bohrium (264)	108 <b>Hs</b> Hassium (277)	109 <b>Mt</b> Meitnerium (268)	110 <b>Ds</b> Darmstadtium (271)	111 <b>Rg</b> Roentgenium (272)	112 <b>Uub</b> Ununbium (285)	113 <b>Uut</b> Ununtrium (284)	114 <b>Uuq</b> Ununquadium (289)	115 <b>Uup</b> Ununpentium (288)	116 <b>Uuh</b> Ununhexium (292)	117 <b>Uus</b> Ununseptium	118 <b>Uuo</b> Ununoctium (294)	

**C** Solid  
**Hg** Liquid  
**H** Gas  
**Rf** Unknown

**Metals**  
 Alkali metals  
 Alkaline earth metals  
 Lanthanoids  
 Actinoids  
 Transition metals  
 Poor metals  
**Nonmetals**  
 Other nonmetals  
 Noble gases



# Silício



5 <b>B</b> Boro 10.811	6 <b>C</b> Carbono 12.0107	7 <b>N</b> Nitrogênio 14.00674
13 <b>Al</b> Alumínio 26.981538	14 <b>Si</b> Silício 28.0855	15 <b>P</b> Fósforo 30.973761
31 <b>Ga</b> Gálio 69.723	32 <b>Ge</b> Germânio 72.64	33 <b>As</b> Arsênio 74.92160

# Silício



# Silício - Quartzo



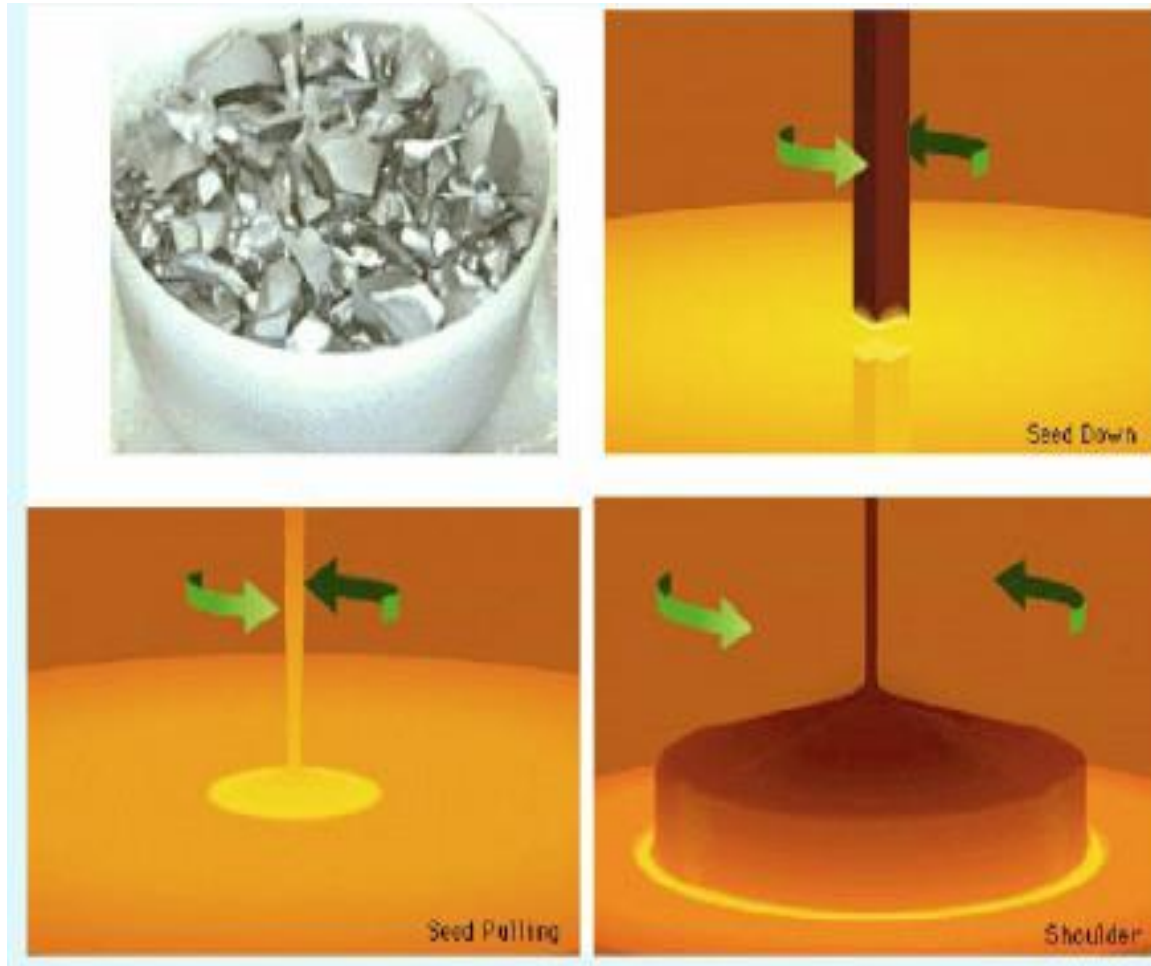
# Lingote de Silício





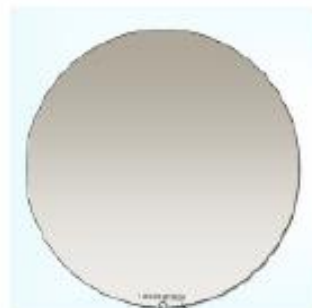
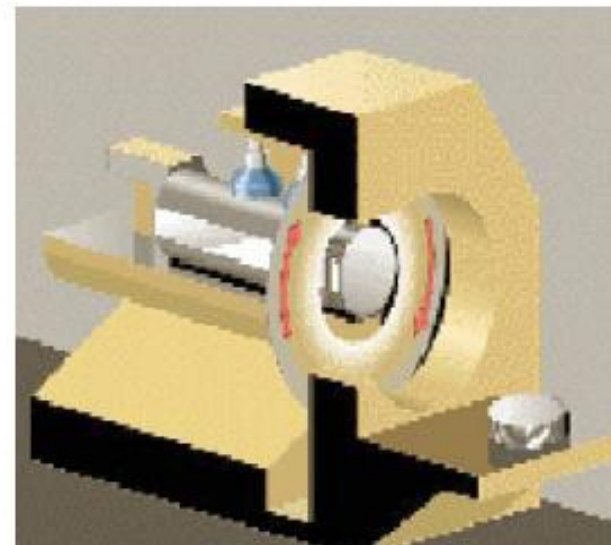
# Crescimento do cristal de Si

## Processo Czochralski

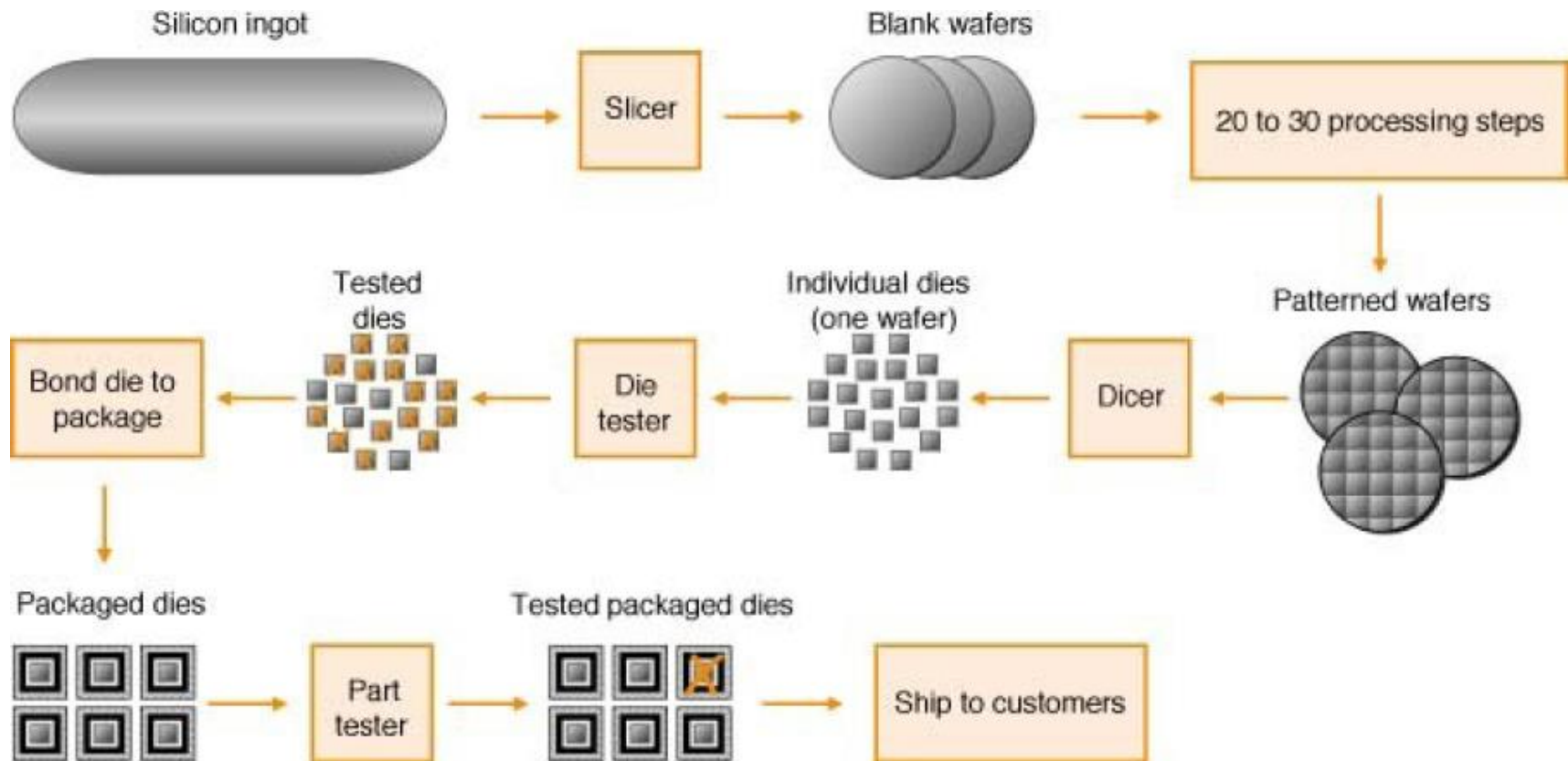


Informações: <http://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski>

# Laminação

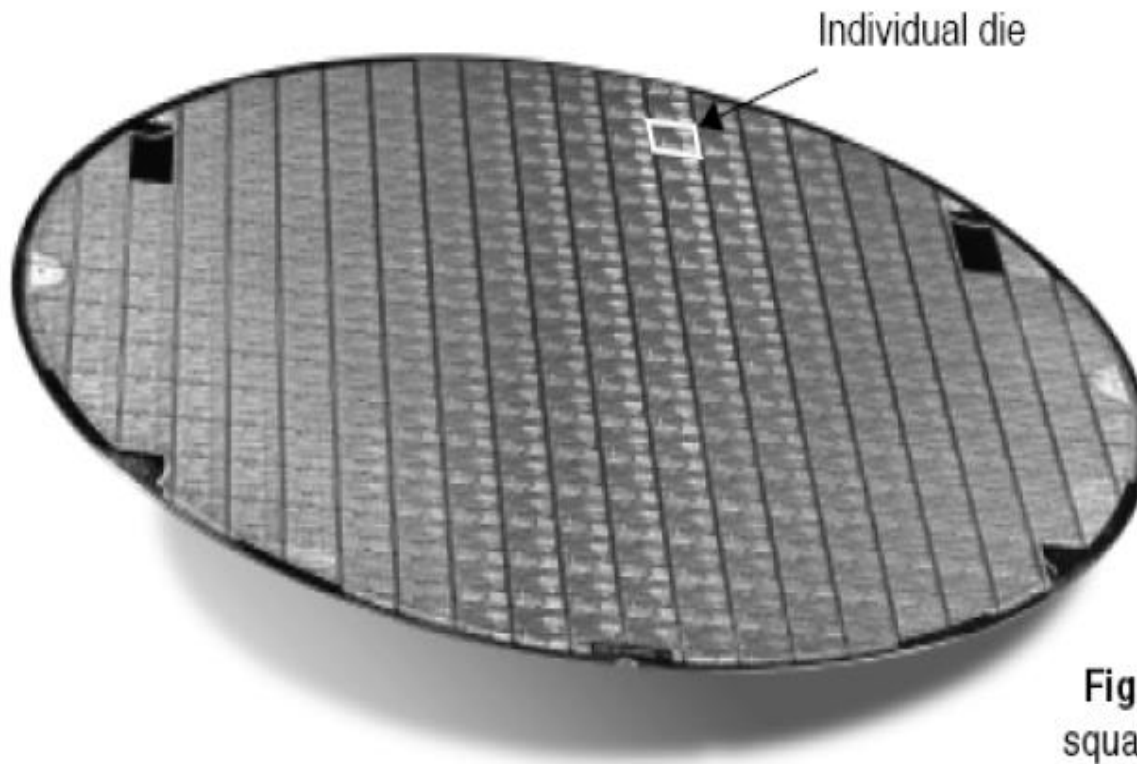


# Fluxo de fabricação



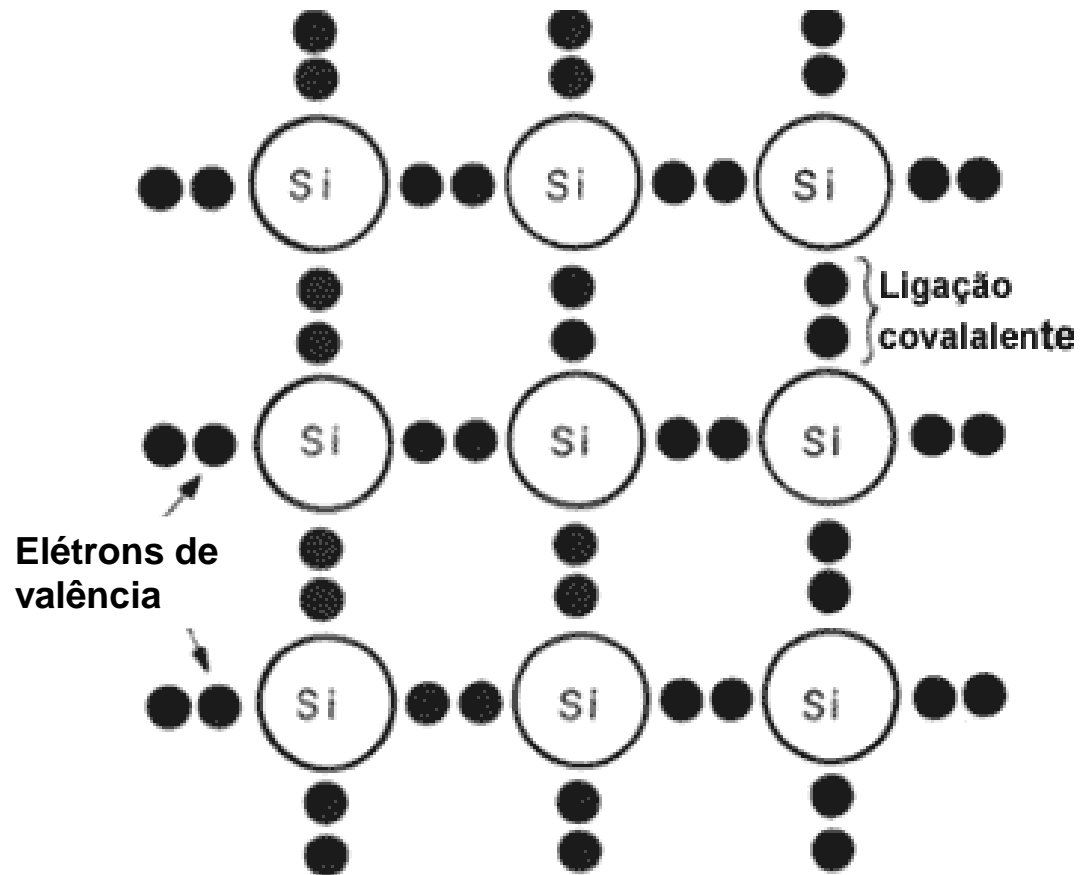


# Wafer

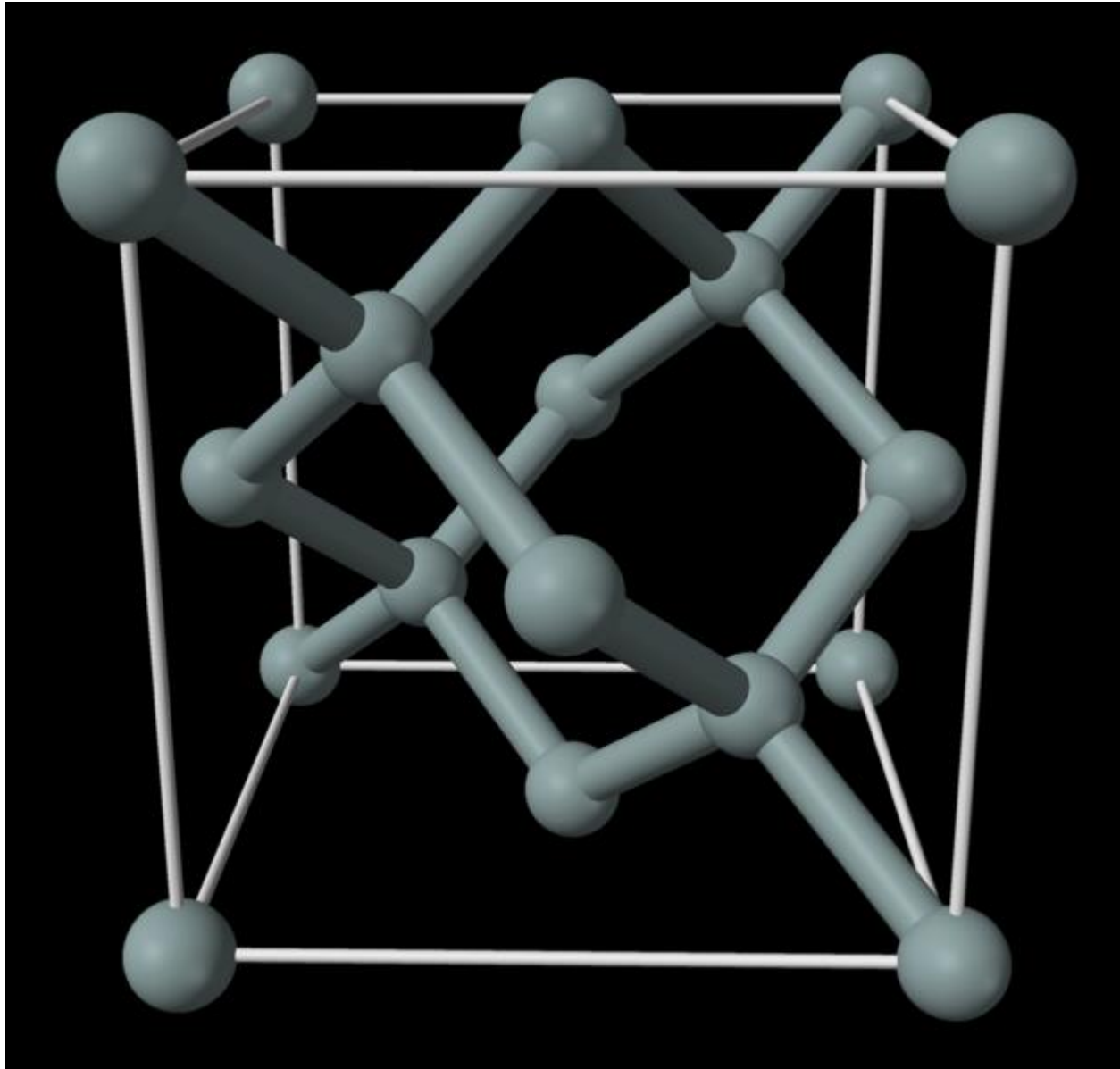


**Figure 1.9** Finished wafer. Each square represents a die - in this case the AMD Duron™ microprocessor (Reprinted with permission from AMD).

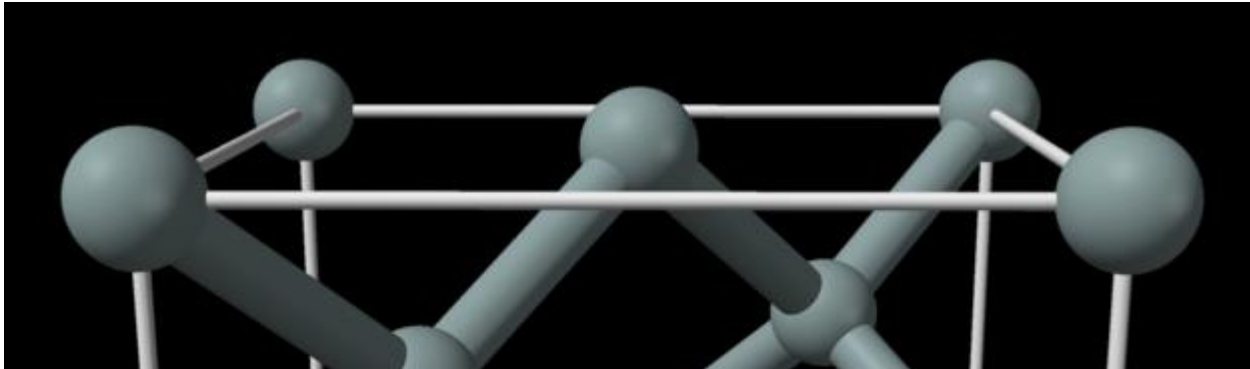
# Ligação covalente



# Estrutura cristalina

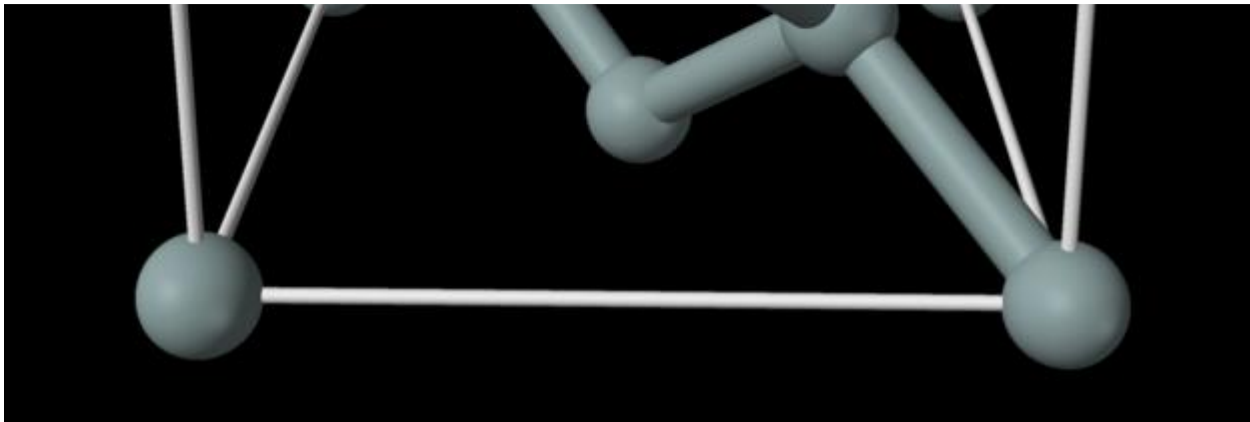


# Estrutura cristalina

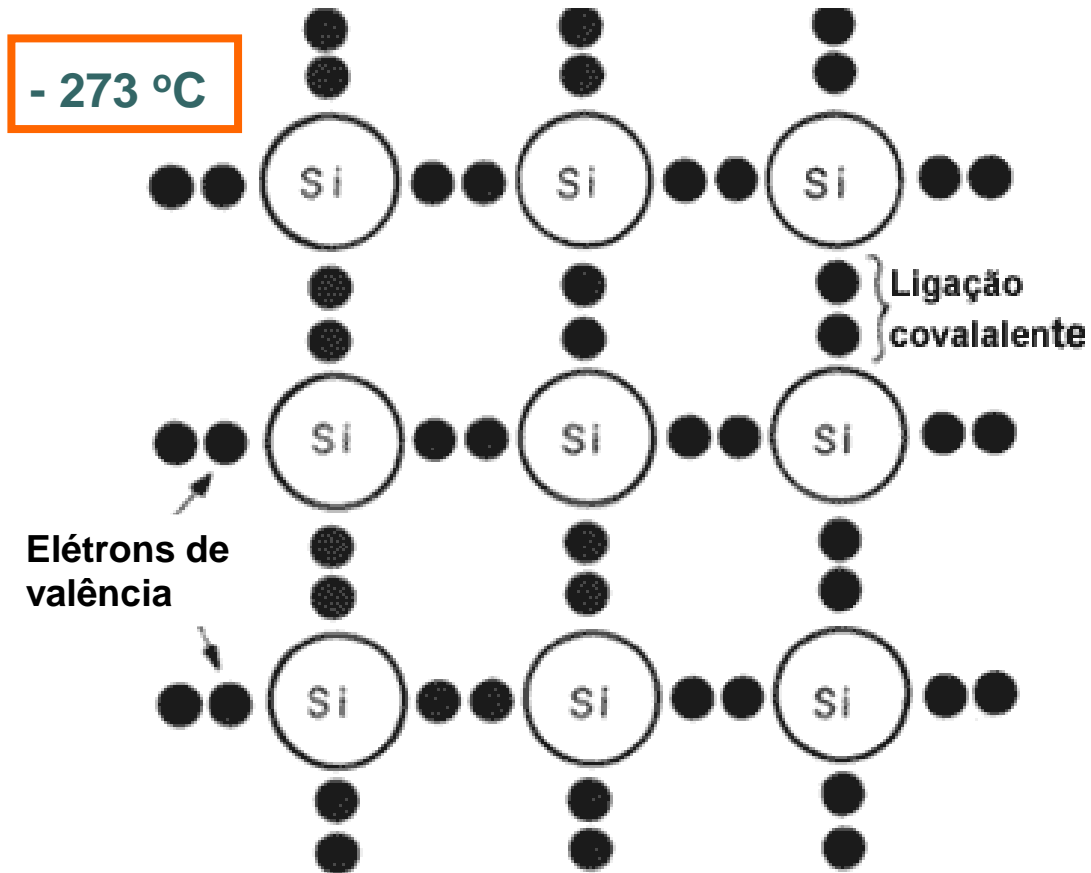


Um cristal é um sólido no qual os constituintes, sejam eles átomos, moléculas ou íons, estão organizados num padrão tridimensional bem definido, que se repete no espaço, formando uma estrutura com uma geometria específica.

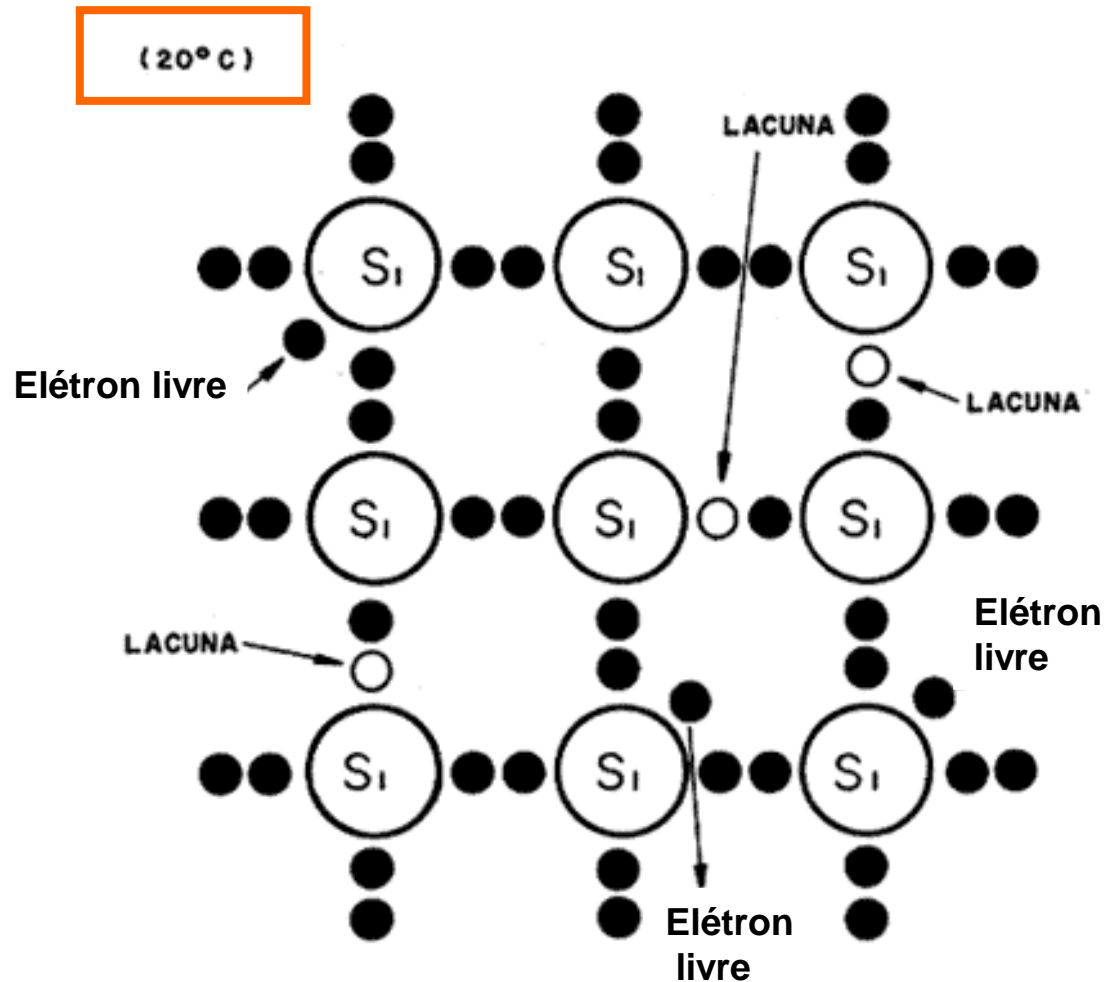
Fonte: Wikipédia.



# Zero Absoluto



# Semiconductor intrínseco



# Estrutura de bandas de energia

**Equação de Schrödinger:**

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \left[ \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}, t) \right] \Psi(\mathbf{r}, t)$$

A equação descreve a evolução temporal do estado quântico de um sistema físico.

Esta equação só tem solução analítica para o átomo de hidrogênio!



# Estrutura de bandas de energia

Equação de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \left[ \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}, t) \right] \Psi(\mathbf{r}, t)$$

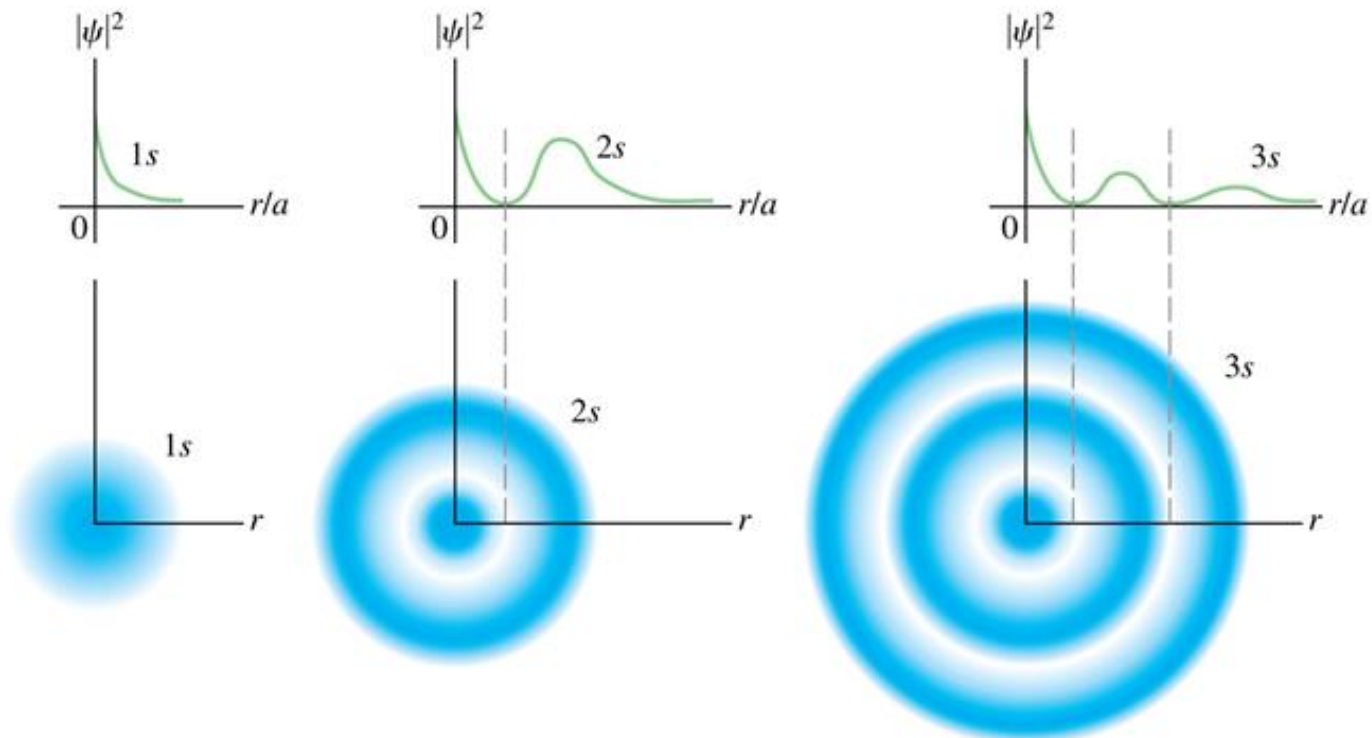
$$\Psi(r, \theta, \phi) = R(r)P(\theta)F(\phi)$$

$n$        $\ell$        $m_\ell$

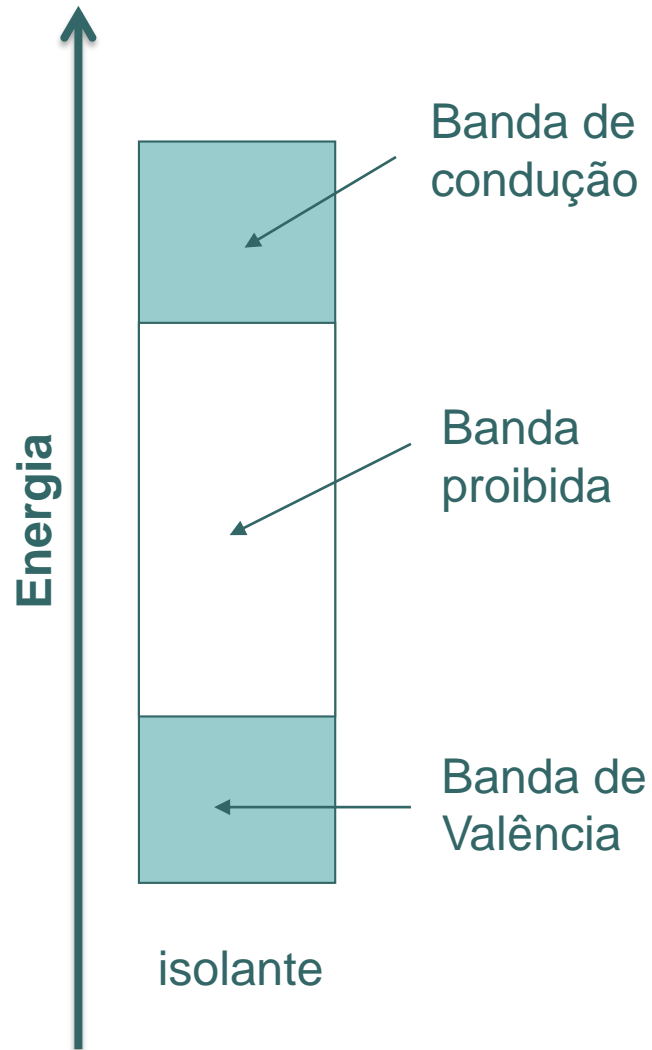
principal  
quantum  
number      orbital  
quantum  
number      magnetic  
quantum  
number

# Estrutura de bandas de energia

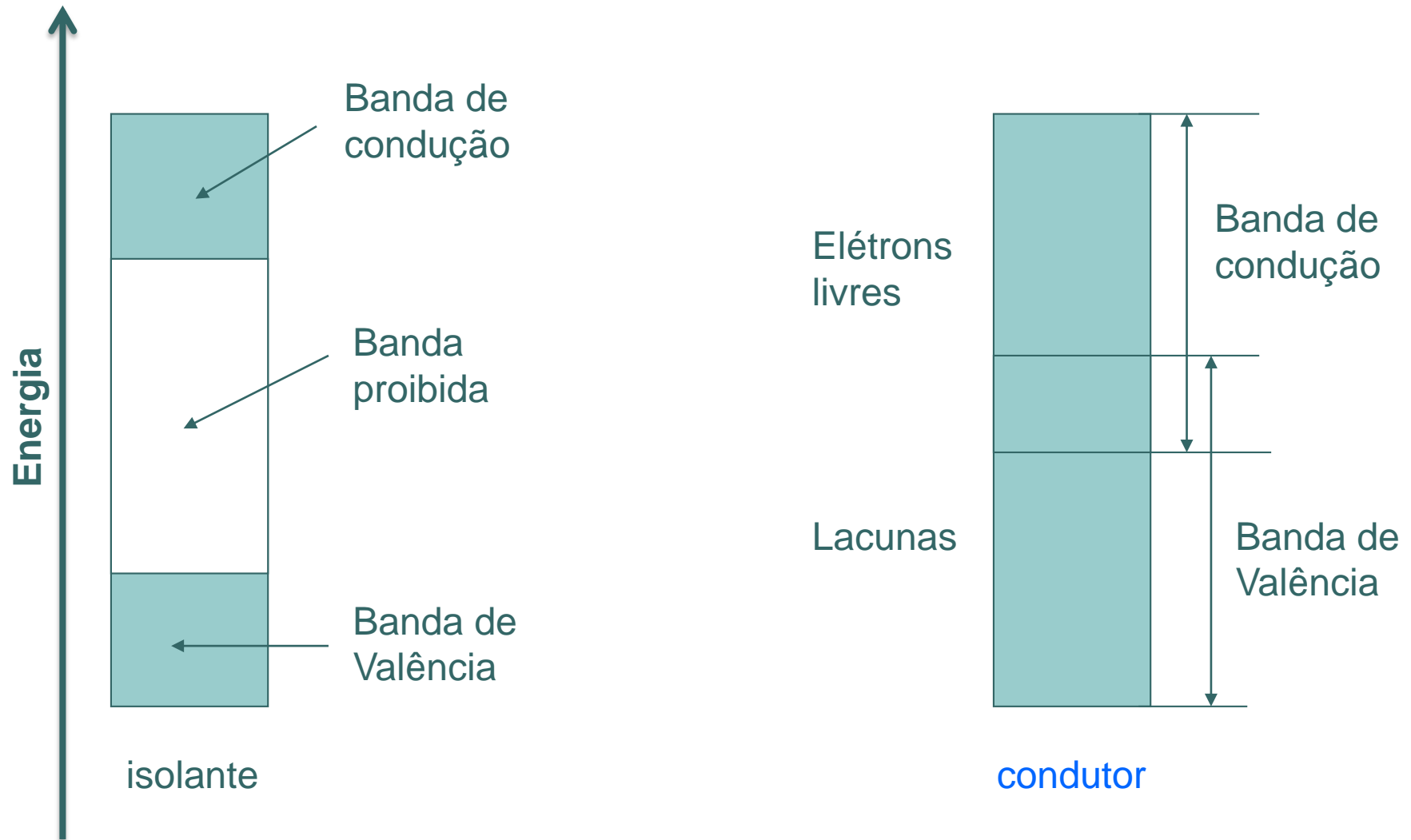
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \left[ \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}, t) \right] \Psi(\mathbf{r}, t)$$



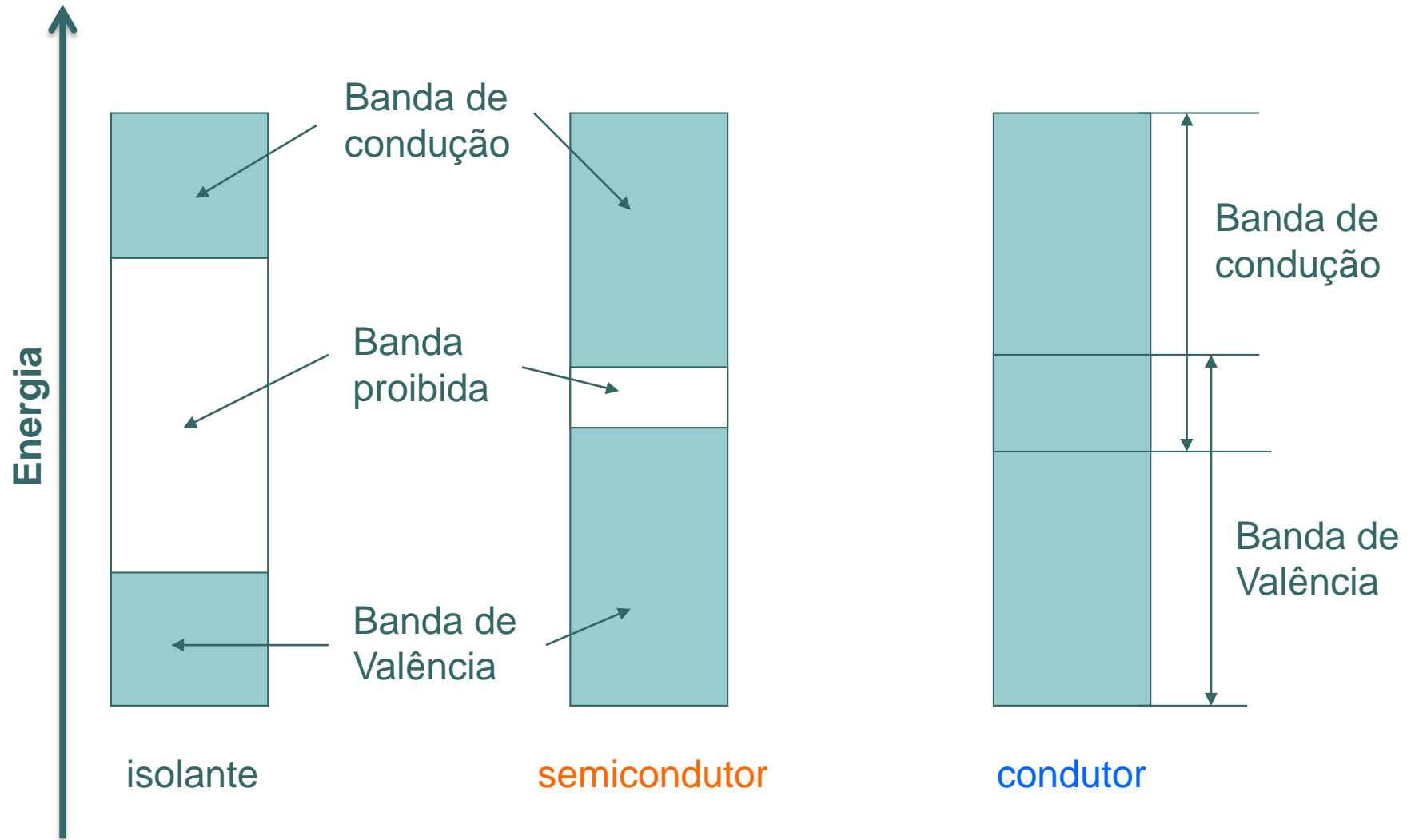
# Estrutura de bandas de energia



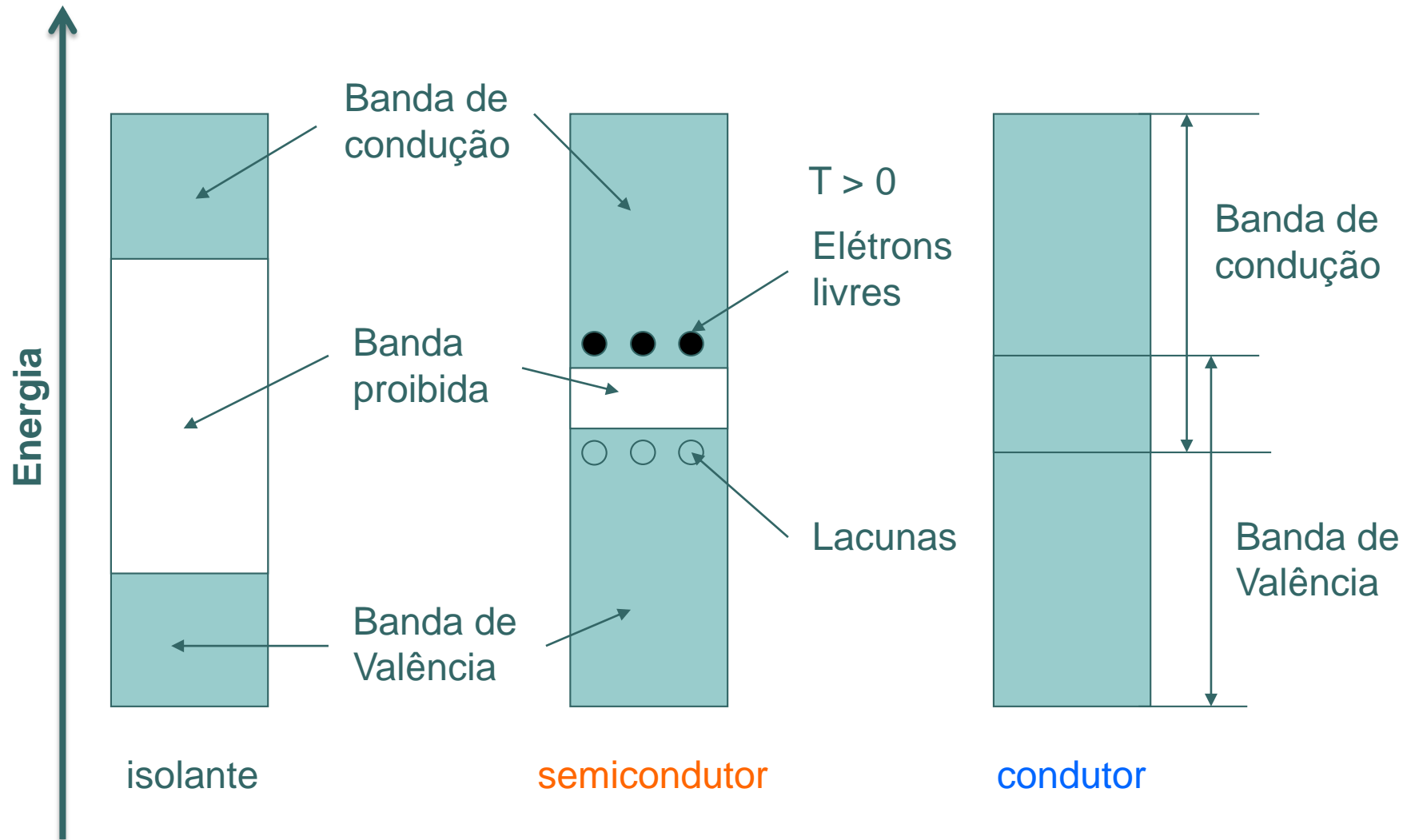
# Estrutura de bandas de energia



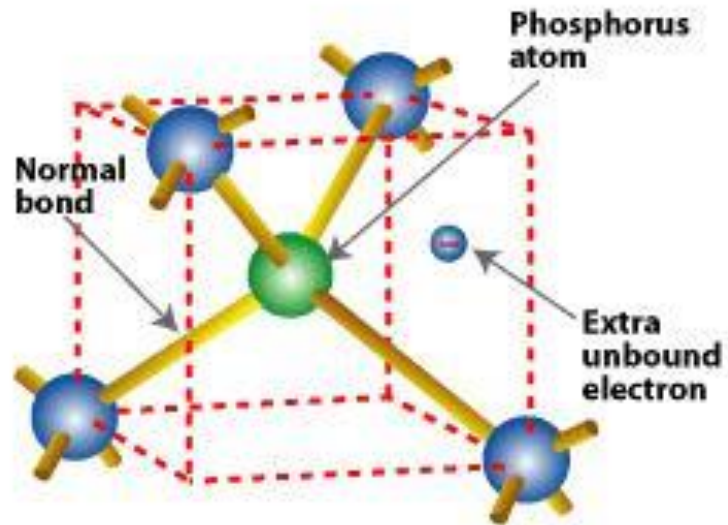
# Estrutura de bandas de energia



# Estrutura de bandas de energia



# Dopagem





# Semicondutor extrínseco - Dopagem

Há diversas formas de se provocar o aparecimento de **pares elétron-lacuna**:

- Energia térmica (ou **calor**)
- luz**

Na prática é necessário que o número de elétrons livres seja bem superior ao número de lacunas ou vice-versa:

⇒ **Dopagem**

- Por meio de técnicas especiais, uma determinada quantidade de outros tipos de átomos (**impurezas**) é adicionada ao semicondutor intrínseco.

# Dopagem

A dopagem é um processo usado na produção de semicondutores que consiste na introdução de impurezas num material semicondutor extremamente puro, ou intrínseco, de forma a alterar as suas propriedades elétricas.

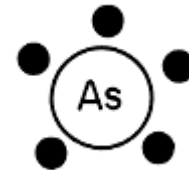
# Processo de dopagem

Quando são adicionadas impurezas a um **semicondutor intrínseco**, este passa a ser um **semicondutor extrínseco**.

As impurezas podem ser de dois tipos:

- **Doadores**
- **Aceitadores**

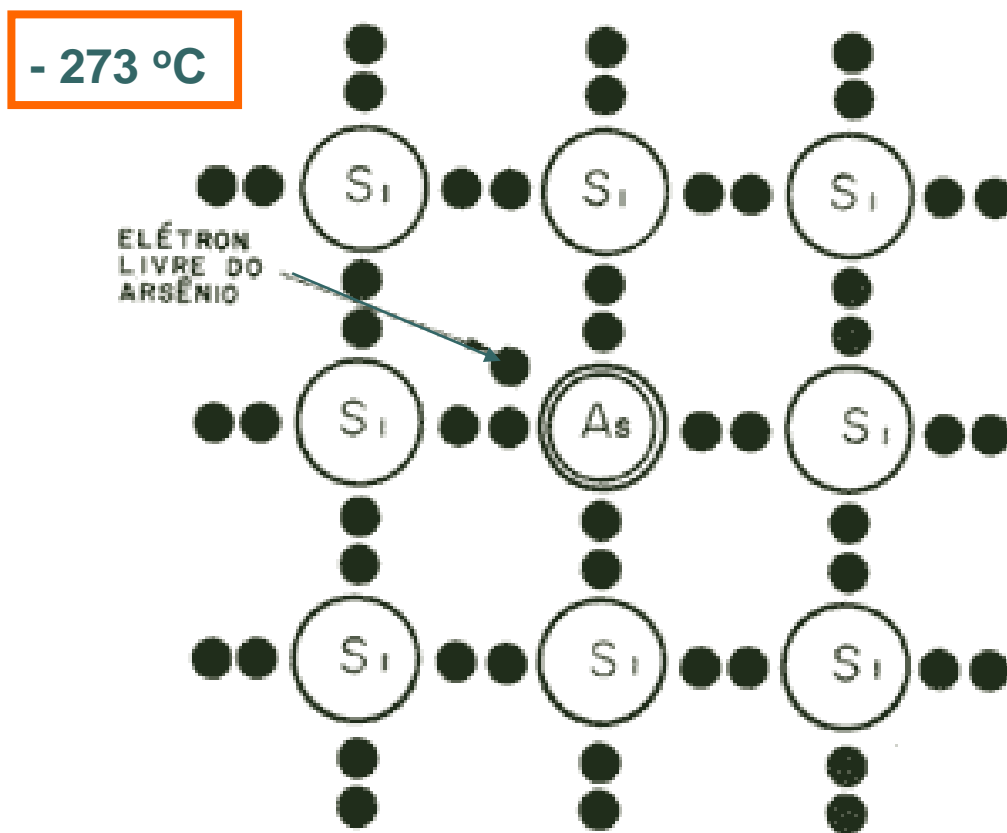
Átomos **doadores** têm cinco elétrons de valência (são pentavalentes): Arsénio (As), Fósforo (P) ou Antimónio (Sb).



Átomos **aceitadores** têm três elétrons de valência (são trivalentes): Índio (In), Gálio (Ga), Boro (B) ou Alumínio (Al).

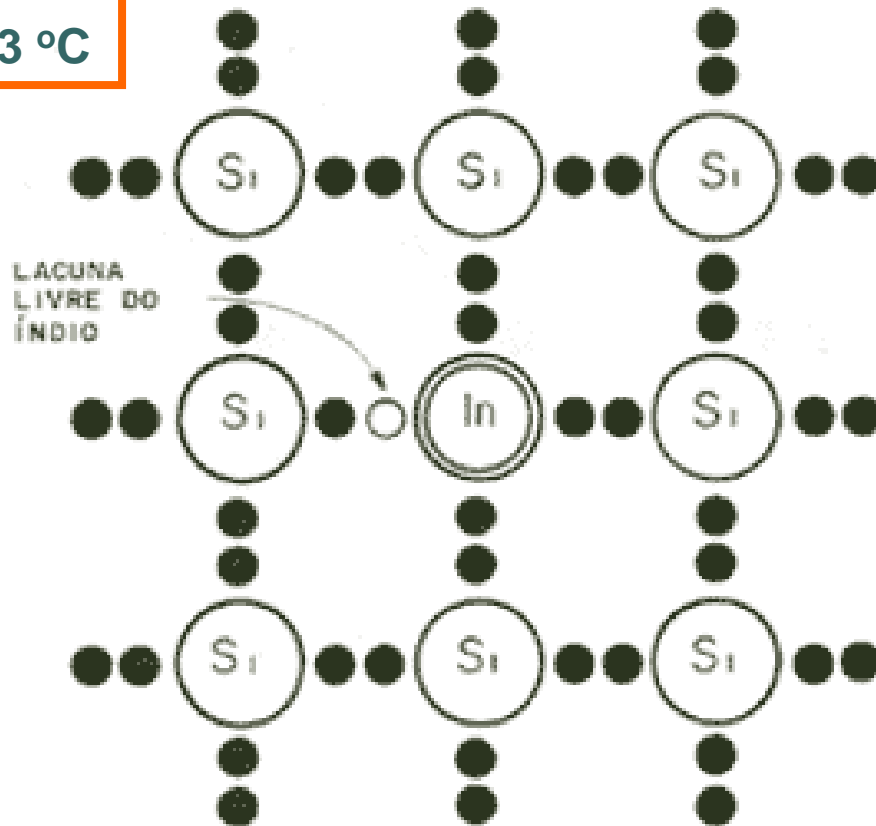


# Doador - Semicondutor do tipo N

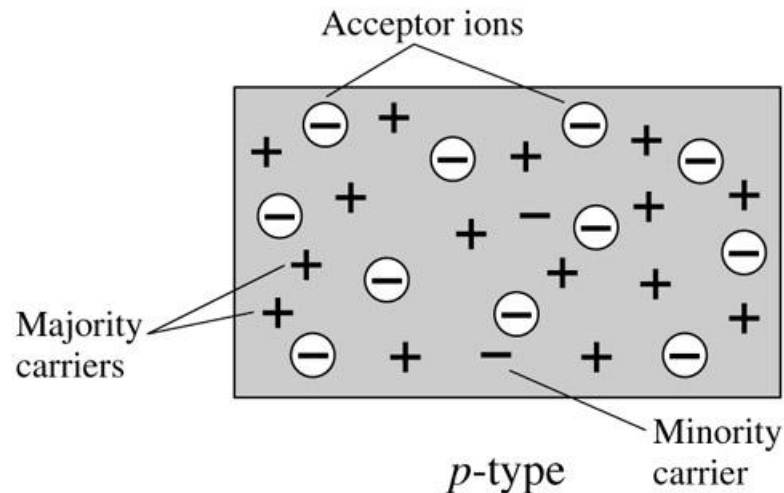
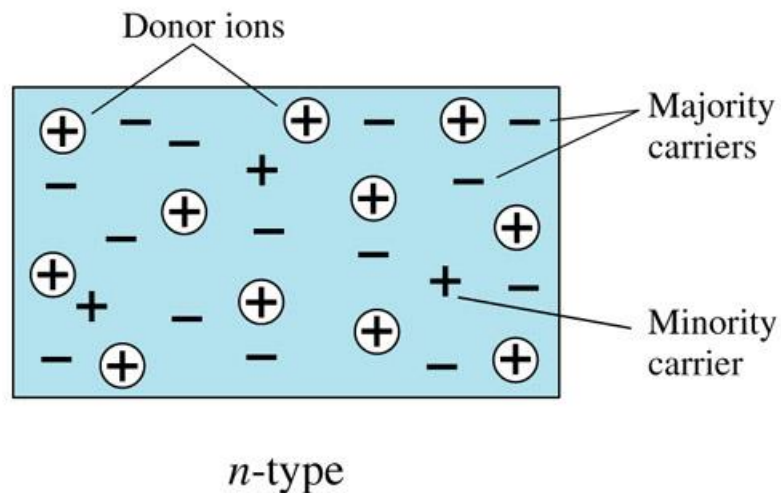


# Aceitador - Semicondutor do tipo P

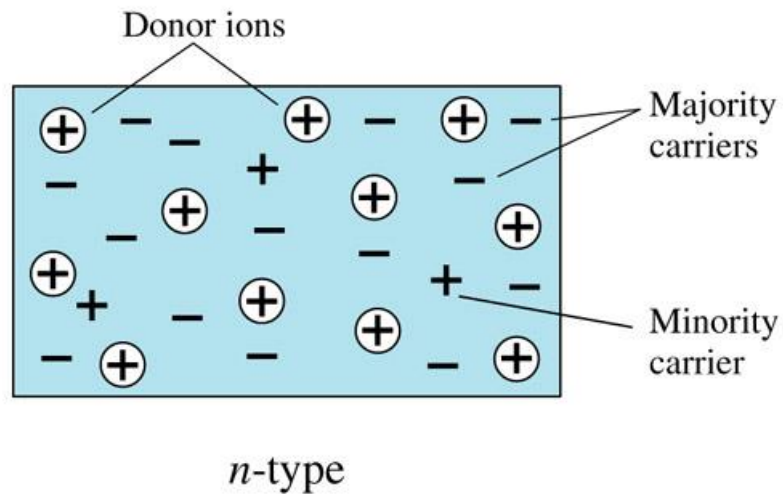
- 273 °C



# Semicondutores do tipo P e N

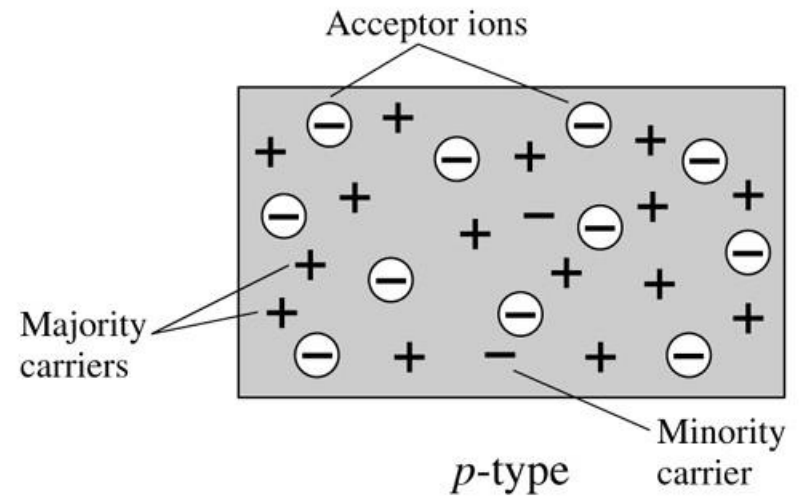


# Semicondutores do tipo N





# Semicondutores do tipo P



# Portadores majoritários e minoritários

Num **semicondutor extrínseco do tipo N**

- **Elétrons** são **portadores majoritários** da corrente elétrica
- As **lacunas** são **portadores minoritários** da corrente elétrica

# Portadores majoritários e minoritários

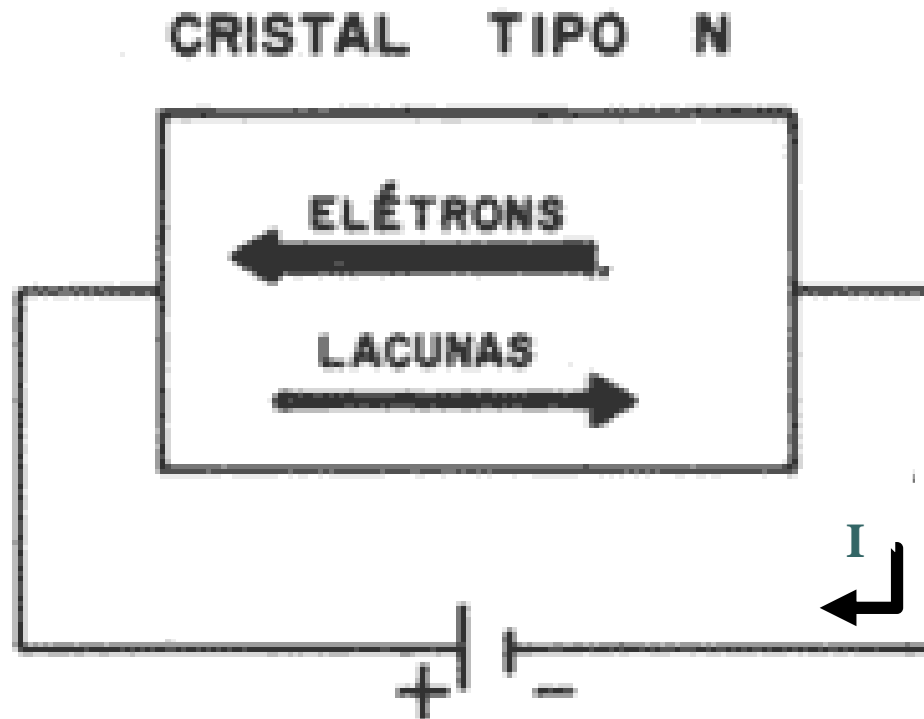
Num **semicondutor extrínseco do tipo N**

- **Elétrons** são **portadores majoritários** da corrente elétrica
- As **lacunas** são **portadores minoritários** da corrente elétrica

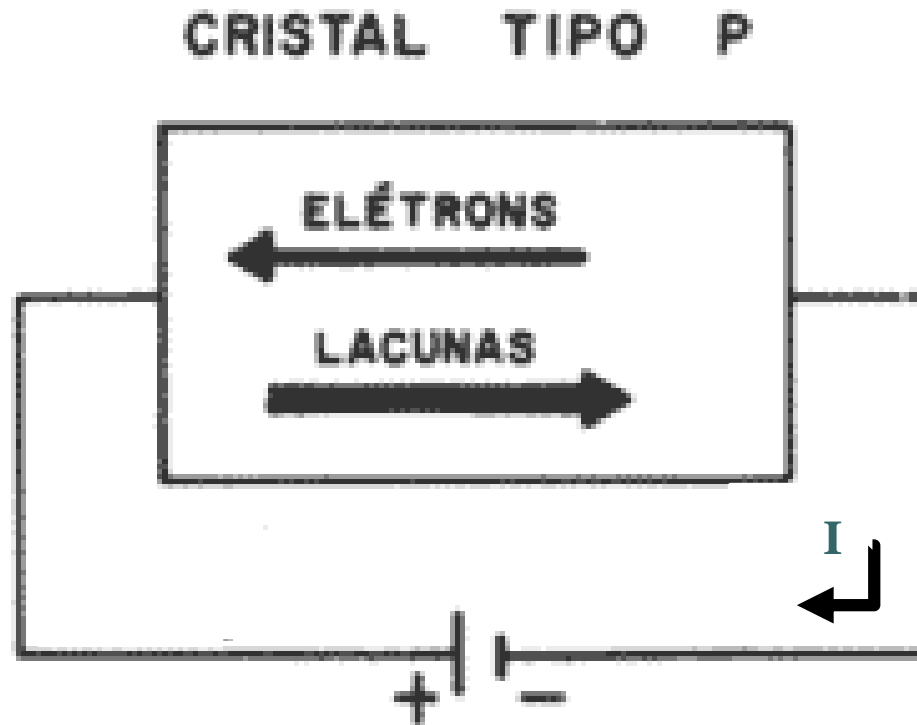
Num **semicondutor extrínseco do tipo P**

- **Lacunas** são **portadores majoritários** da corrente elétrica
- **Elétrons** são **portadores minoritários** da corrente elétrica

# Movimento dos elétrons e das lacunas nos semicondutores do tipo N



# Movimento dos elétrons e das lacunas nos semicondutores do tipo P



# Perguntas

---

- O que é resistividade?
- Como se calcula a resistência elétrica de um corpo físico?
- Qual o principal elemento utilizado para fabricar dispositivos eletrônicos?
- O que são dopantes doadores e aceitadores?
- O que são semicondutores intrínsecos e extrínsecos?
- O que é um semicondutor tipo P? E tipo N?