

Semicondutores

1-INTRODUÇÃO

PROF. CÉSAR AUGUSTO DARTORA - UFPR

E-MAIL: DARTORA@UFPR.BR

Roteiro do Capítulo:

- Por que estudar Física dos Semicondutores?
- Breve História da Eletrônica e Perspectivas
- Classificação dos Materiais de Acordo com a Condutividade
- Overview: Materiais Semicondutores

Por que estudar Física dos Semicondutores?

~> Além de pura curiosidade científica, engenheiros trabalham com modelos matemáticos de dispositivos;

~> Existem diferentes níveis de análise em grau crescente de complexidade: Dispositivo, Integração de Dispositivos, Sistemas e Integração de Sistemas;

~> O elemento básico em qualquer nível é o dispositivo. Portanto é preciso criar modelos para os diversos dispositivos;

~> Os modelos de primeiros princípios são derivados da física dos materiais que constituem o dispositivo.

~> Análise e Síntese: O estudo de fundamentos físicos dos materiais, além de permitir a modelagem de algo existente, pode permitir vislumbrar novas aplicações e engenharia de dispositivos;

Uma Breve História da Eletrônica

● O Século XIX

- Por volta de 1860 - forma final das equações de Maxwell unificando eletricidade, magnetismo e óptica;
- Surge uma tecnologia baseada no uso da energia elétrica e aplicações da Teoria Eletromagnética:
 - Thomas Edison e a lâmpada: surge uma aplicação fabulosa para a eletricidade que gradativamente "aposenta" as lamparinas a combustível, com ganho inquestionável em eficiência;
 - Lei da indução de Faraday: motores e geradores de corrente alternada e contínua, transformadores;
 - Início das Telecomunicações: o Telégrafo, o Telefone e o Rádio, cujo entendimento completo só é possível através das equações de Maxwell;
- 1897 - Thomson descobre o elétron - partícula fundamental e ator principal da Eletrônica.

- **Século XX**

↪ Este século é marcado por duas revoluções científicas:

- **Relatividade de Einstein (1905)**
- **Física Quântica (início com Max Planck ~ 1900)!!**

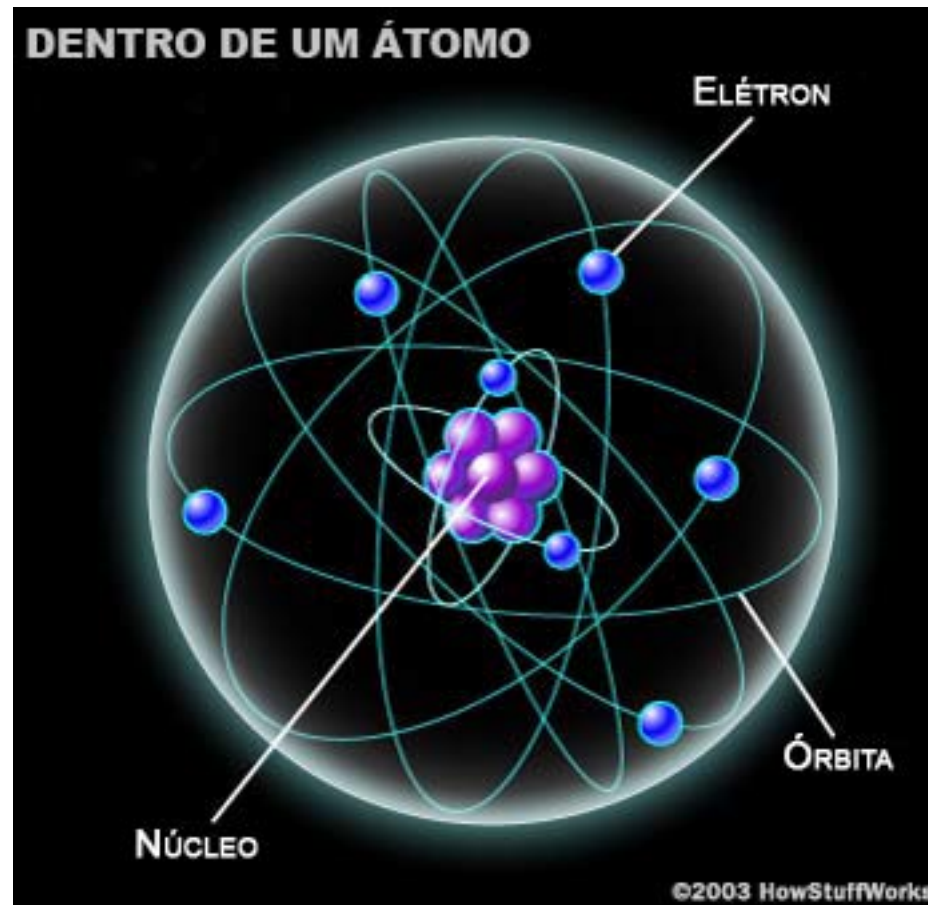
Física Quântica - teve maior impacto sobre o desenvolvimento tecnológico.

- Formulação matemática foi desenvolvida sobretudo na década 1920: **E. Schrödinger, N. Bohr, W. Heisenberg, P.A.M. Dirac, Max Born, W. Pauli, P. Jordan**, dentre outros.

- Estuda os fenômenos da escala atômica. Permite compreender a dualidade onda-partícula, a natureza corpuscular da luz, os átomos e a estrutura da matéria. **Quantum: quantidade mínima de alguma grandeza!**

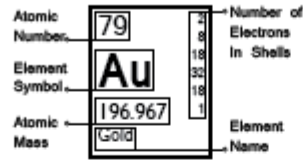
Eq. de Schrödinger:

$$\hat{H}\psi(x, y, z) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(x, y, z) = E\psi(x, y, z)$$



Periodic Table of the Elements

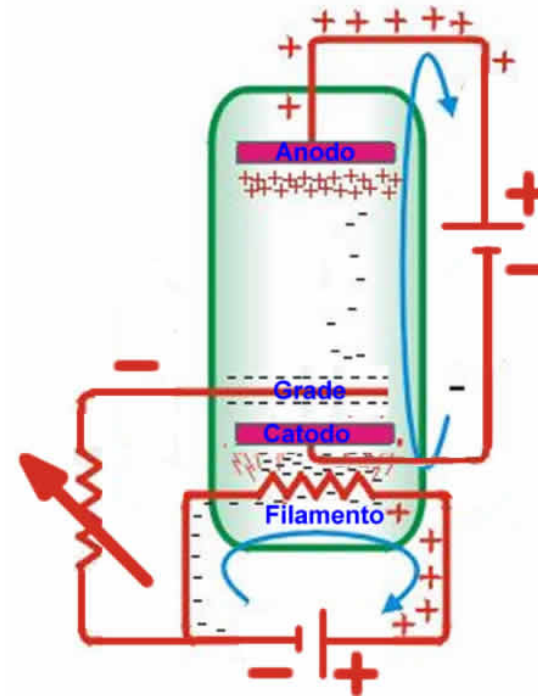
													13						
1 H 1.008 Hydrogen											2 He 4.003 Helium								
3 Li 6.941 Lithium	4 Be 9.012 Beryllium											5 B 10.811 Boron	6 C 12.011 Carbon	7 N 14.007 Nitrogen	8 O 15.999 Oxygen	9 F 18.998 Fluorine	10 Ne 20.180 Neon		
11 Na 22.990 Sodium	12 Mg 24.305 Magnesium											13 Al 26.982 Aluminum	14 Si 28.085 Silicon	15 P 30.974 Phosphorus	16 S 32.065 Sulfur	17 Cl 35.453 Chlorine	18 Ar 39.948 Argon		
19 K 39.098 Potassium	20 Ca 40.078 Calcium	21 Sc 44.956 Scandium	22 Ti 47.88 Titanium	23 V 50.942 Vanadium	24 Cr 51.996 Chromium	25 Mn 54.938 Manganese	26 Fe 55.933 Iron	27 Co 58.933 Cobalt	28 Ni 58.693 Nickel	29 Cu 63.546 Copper	30 Zn 65.39 Zinc	31 Ga 69.732 Gallium	32 Ge 72.61 Germanium	33 As 74.922 Arsenic	34 Se 78.09 Selenium	35 Br 79.904 Bromine	36 Kr 84.80 Krypton		
37 Rb 84.468 Rubidium	38 Sr 87.62 Strontium	39 Y 88.906 Yttrium	40 Zr 91.224 Zirconium	41 Nb 92.905 Niobium	42 Mo 95.94 Molybdenum	43 Tc 98.907 Technetium	44 Ru 101.07 Ruthenium	45 Rh 102.906 Rhodium	46 Pd 106.42 Palladium	47 Ag 107.868 Silver	48 Cd 112.411 Cadmium	49 In 114.818 Indium	50 Sn 118.71 Tin	51 Sb 121.760 Antimony	52 Te 127.6 Tellurium	53 I 126.904 Iodine	54 Xe 131.29 Xenon		
55 Cs 132.905 Cesium	56 Ba 137.327 Barium	57-71 Lanthanide Series	72 Hf 178.49 Hafnium	73 Ta 180.948 Tantalum	74 W 183.85 Tungsten	75 Re 186.207 Rhenium	76 Os 190.23 Osmium	77 Ir 192.22 Iridium	78 Pt 195.08 Platinum	79 Au 196.967 Gold	80 Hg 200.59 Mercury	81 Tl 204.383 Thallium	82 Pb 207.2 Lead	83 Bi 208.980 Bismuth	84 Po [208.982] Polonium	85 At 209.987 Astatine	86 Rn 222.018 Radon		
87 Fr 223.020 Francium	88 Ra 226.025 Radium	89-103 Actinide Series	104 Rf [261] Rutherfordium	105 Db [262] Dubnium	106 Sg [266] Seaborgium	107 Bh [264] Bohrium	108 Hs [269] Hassium	109 Mt [268] Meitnerium	110 Ds [269] Darmstadtium	111 Rg [272] Roentgenium	112 Cn [277] Copernicium	113 Uut Unknown Ununtrium	114 Fl [289] Flerovium	115 Uup Unknown Ununpentium	116 Lv [296] Livermorium	117 Uus Unknown Ununseptium	118 Uuo Unknown Ununoctium		



57 La 138.906 Lanthanum	58 Ce 140.115 Cerium	59 Pr 140.908 Praseodymium	60 Nd 144.24 Neodymium	61 Pm 144.913 Promethium	62 Sm 150.36 Samarium	63 Eu 151.966 Europium	64 Gd 157.25 Gadolinium	65 Tb 158.925 Terbium	66 Dy 162.50 Dysprosium	67 Ho 164.930 Holmium	68 Er 167.26 Erbium	69 Tm 168.934 Thulium	70 Yb 173.04 Ytterbium	71 Lu 174.967 Lutetium
89 Ac 227.028 Actinium	90 Th 232.038 Thorium	91 Pa 231.036 Protactinium	92 U 238.029 Uranium	93 Np 237.048 Neptunium	94 Pu 244.064 Plutonium	95 Am 243.061 Americium	96 Cm 247.070 Curium	97 Bk 247.070 Berkelium	98 Cf 251.080 Californium	99 Es [254] Einsteinium	100 Fm 257.095 Fermium	101 Md 258.1 Mendelevium	102 No 259.101 Nobelium	103 Lr [262] Lawrencium

- Alkali Metal
- Alkaline Earth
- Transition Metal
- Basic Metal
- Semimetal
- Nonmetal
- Halogen
- Noble Gas
- Lanthanide
- Actinide

- 1907: Lee de Forest inventou a válvula triodo. Desenvolvimento da eletrônica estava inicialmente baseada nas válvulas, para fazer amplificadores e osciladores de RF.



- Problemas: alto consumo de energia, aquecimento, tamanho não reduzido e peso; tempo de vida curto(queimavam facilmente!)

1939-1945 - Segunda Guerra Mundial: "explosão" de tecnologia em sistemas de comunicação para navegação aérea, marítima e submarina, necessidade de desenvolver tecnologia de radares (microondas) e dispositivos para fazer muitos cálculos - o computador, para quebrar códigos de guerra, etc.

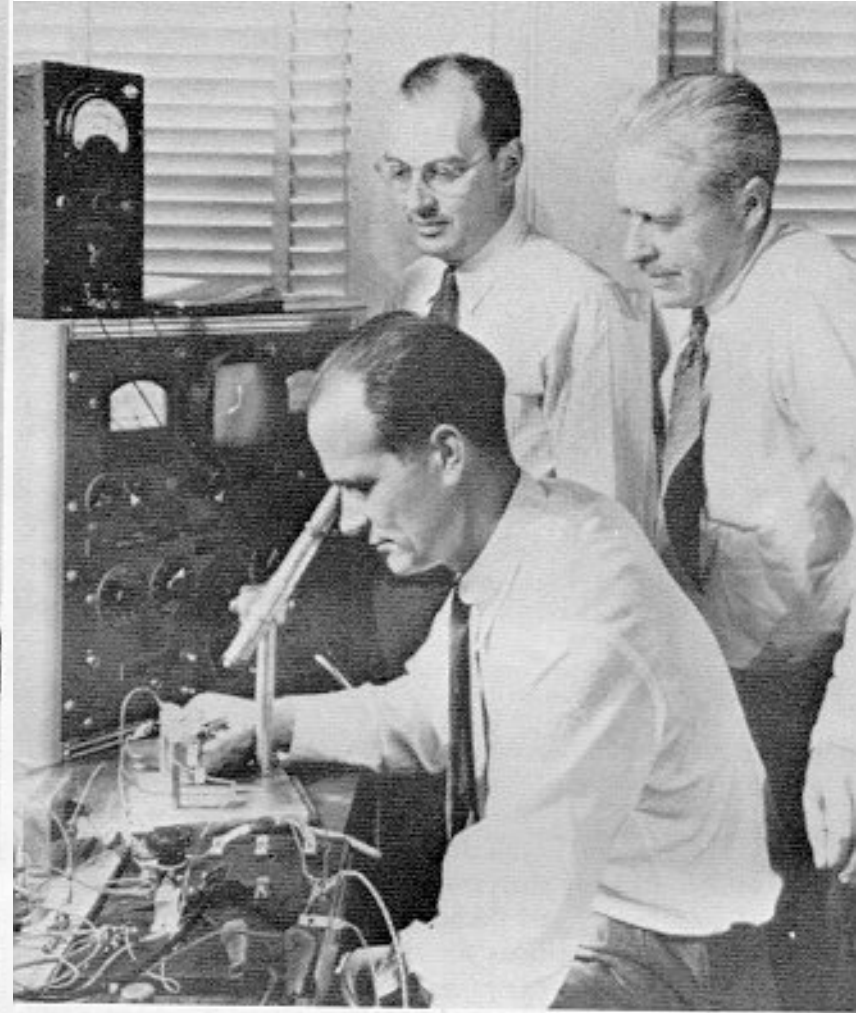
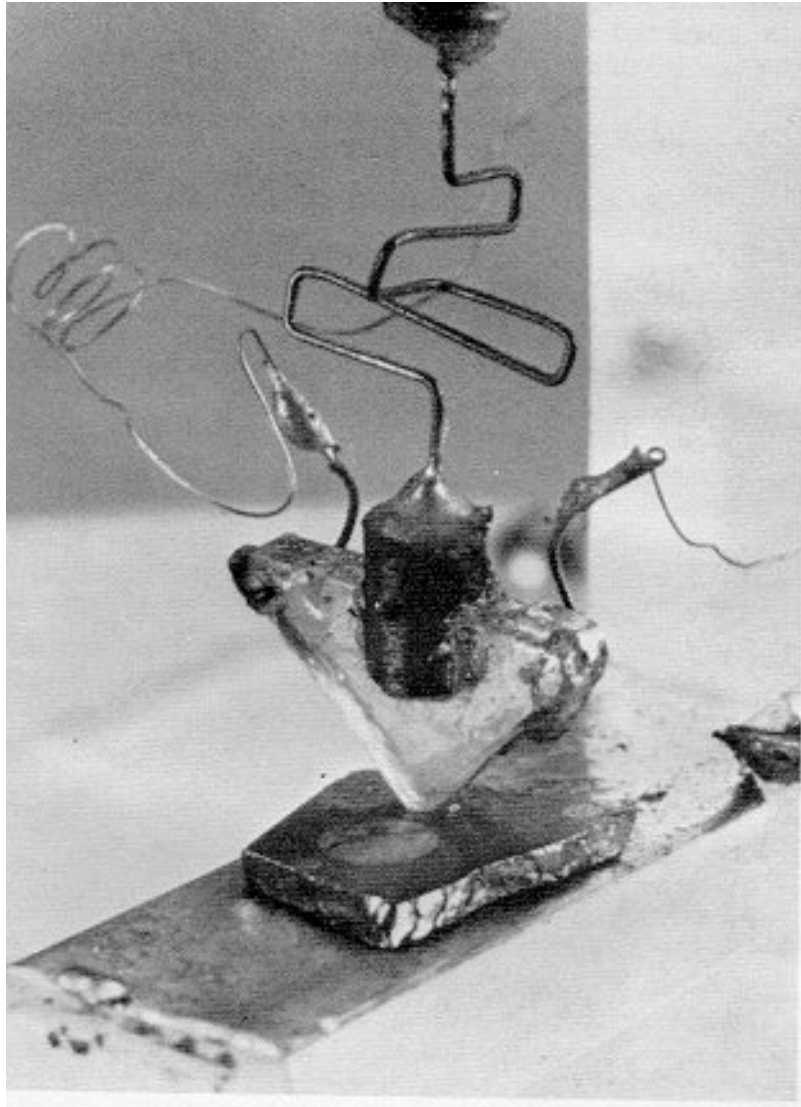


SEMICONDUCTORES - Si, Ge, GaAs... Interesse inicial:
efeito termistor

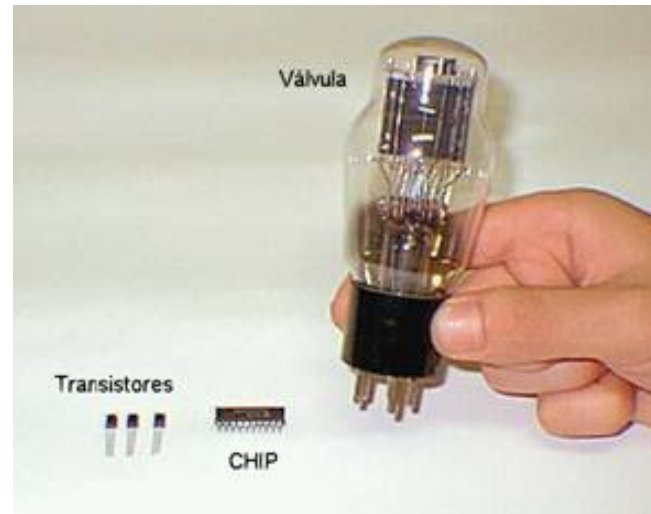
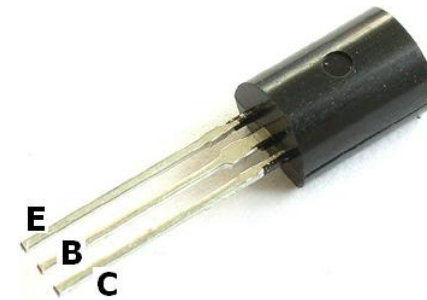
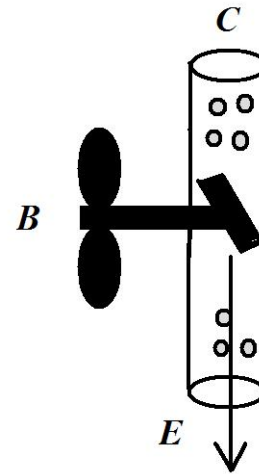
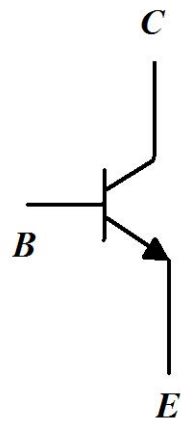
A Física Quântica é fundamental na previsão do comportamento de materiais e dispositivos semicondutores como diodos e transistores.

Dezembro de 1947 - **Schockley, Bardeen e Brattain** do Bell Lab. \Rightarrow descobrem o efeito transistor. Válvulas eletrônicas podem ser substituídas por dispositivos menores, mais leves, de menor consumo e com vida útil muito maior!

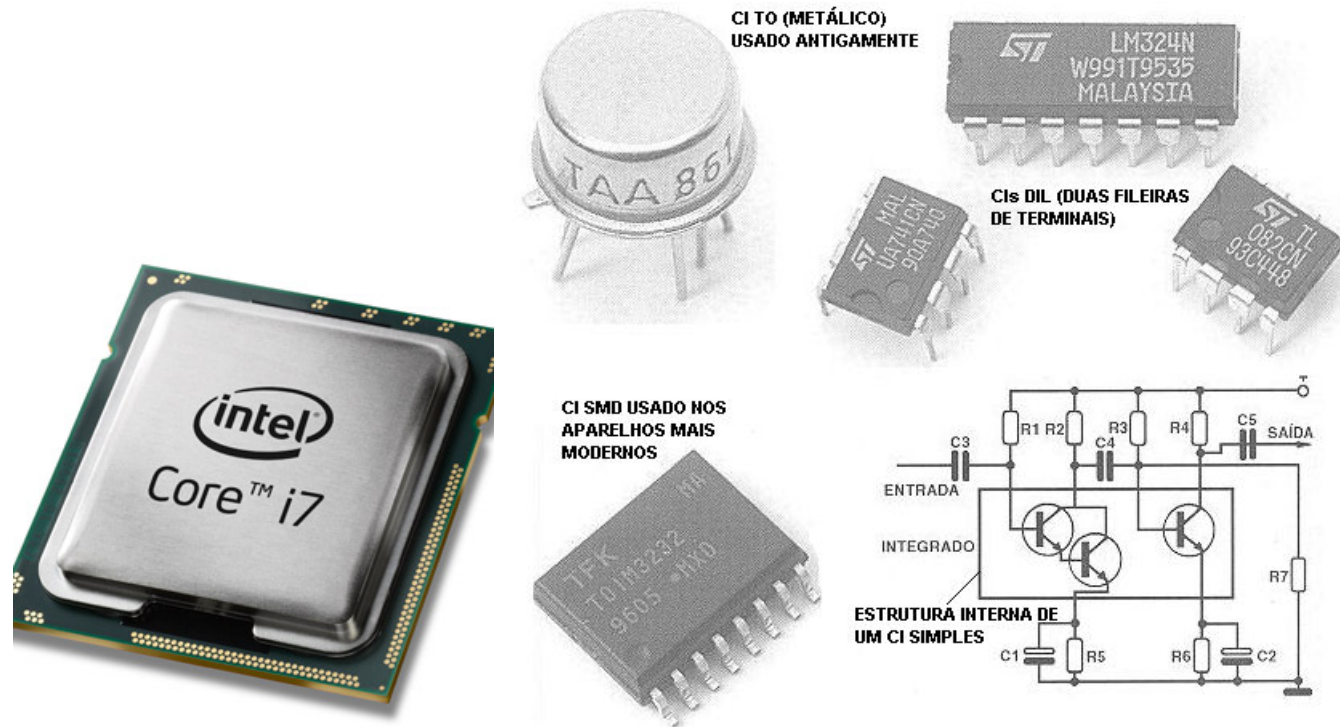
Prêmio Nobel de Física de 1956 para os três... (aprox. 50% dos prêmios Nobel em Física foram dados para contribuições na área de eletrônica.)



EFEITO TRANSISTOR: é uma válvula de "estado sólido" onde é possível controlar a corrente elétrica entre dois terminais a partir de um terceiro, que age como uma "torneira".



~> Física dos Semicondutores permitiu desenvolver diodos e transistores cada vez menores, e sua organização em circuitos integrados



permitiu:

- Redução do custo e popularização de eletro-eletrônicos: rádio, tv, etc...
- Desenvolvimento de computadores pessoais, aparelhos celulares, câmeras digitais, ipods, etc - cada vez menores e mais rápidos.

↪ É interessante olhar para o passado e ver algumas "previsões" para o uso de computadores:

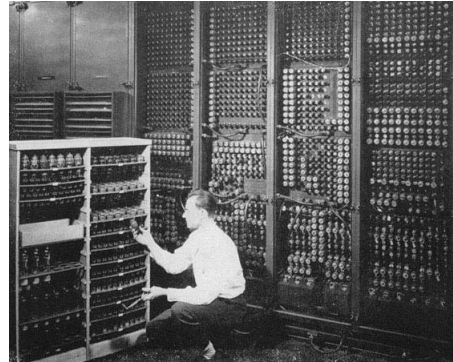
"Um computador no futuro não pesará mais que uma tonelada e meia" (Popular Mechanics, 1949)

"Penso que há mercado mundial para no máximo uns cinco computadores" (T. Watson - presidente da IBM em 1943)

"Não há razão para alguém querer ter um computador em sua casa" (K.Olson, presidente da DEC em 1977)

"640 kbytes de memória deve ser o suficiente para qualquer pessoa" (Bill Gates, 1981)

COMPARAÇÃO ENTRE O ENIAC E O INTEL DUAL CORE



X



MODELO	ENIAC	INTEL DUAL CORE
Ano	1948	2008
Desempenho	5000 adições/seg	22 bilhões de operações/seg
Consumo	170 mil watts	31 watts
Peso	28 tons	negligenciável
Conteúdo	18 mil válvulas	152 milhões de transistores
Custo	US\$ 487 mil	US\$ 600

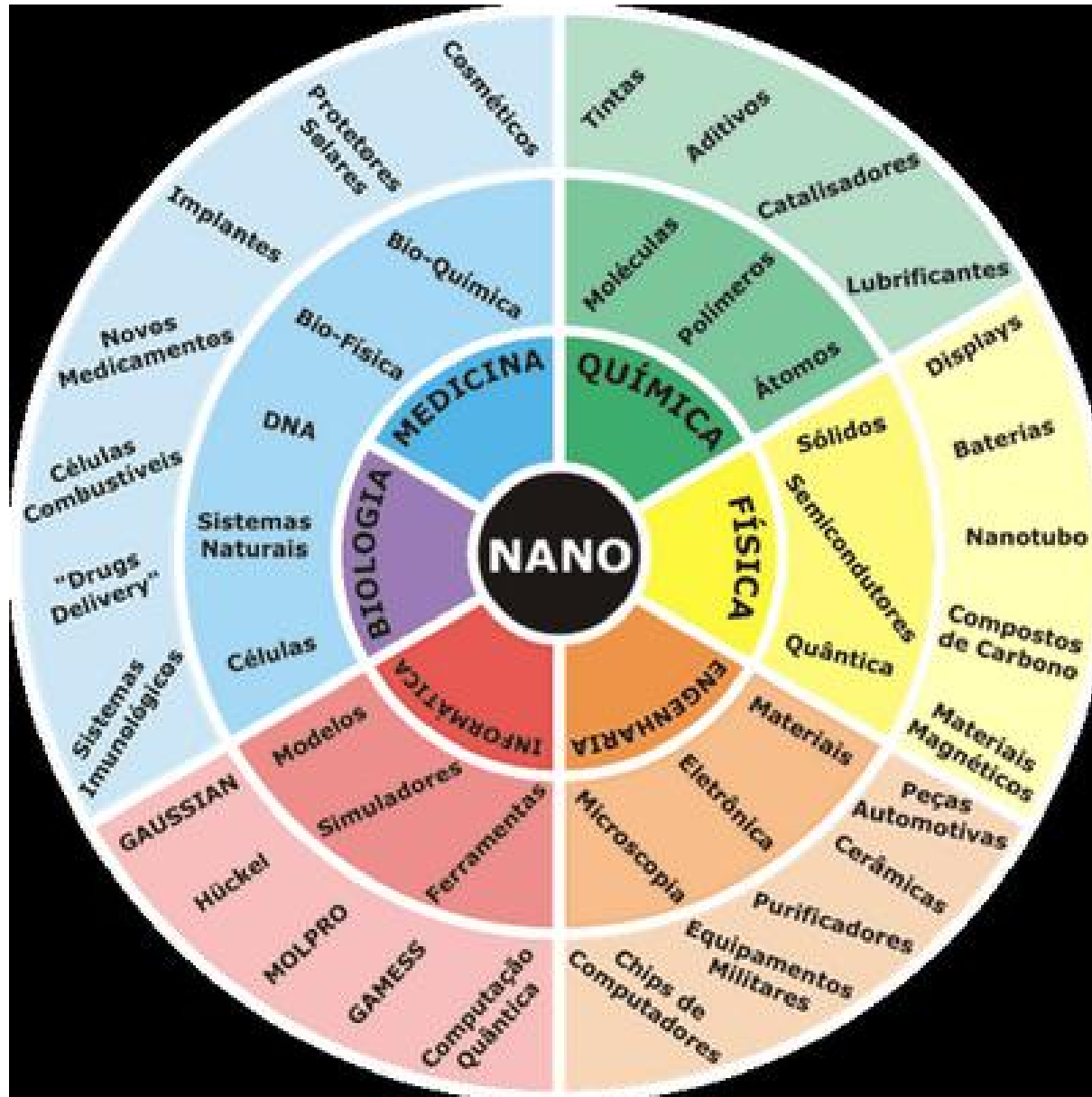
Lei de Moore (1975): com a crescente miniaturização e integração dos circuitos eletrônicos, o número de transistores em um chip iria dobrar a cada 18 meses, no mesmo espaço físico, pelo mesmo custo.

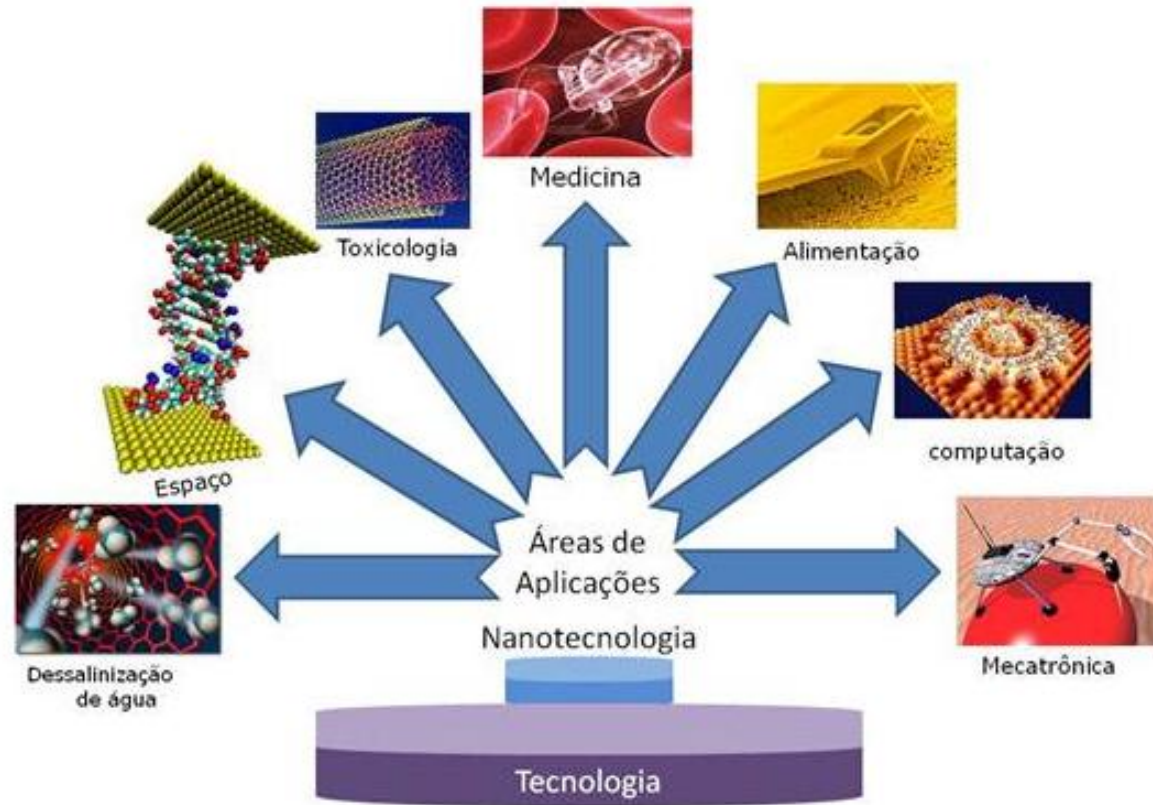
Século XXI - Perspectivas e Nanotecnologia

~> **Richard Feynmann** em um discurso em **1959** na American Physical Society abriu as portas para a **Nanotecnologia** prevendo que no futuro (o nosso hoje) o **homem construiria máquinas e dispositivos montando-os átomo a átomo.**

~> O tamanho de um átomo corresponde a **0.1nm** ou **1 Angstrom.**

Possibilidades: **Nanomáquinas, nanomoléculas projetadas para uso em medicina, etc.**





~> A física dos semicondutores poderia ser dividida em eras:

Era da Eletrônica: componentes discretos, circuitos integrados com poucos transistores, como amplificadores operacionais;

Era da Microeletrônica: circuitos integrados em larga escala - milhares e milhões de transistores em um único chip;

$1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m} \rightarrow 10000$ átomos em uma linha reta.

Era da Nanoeletrônica: estágio atual, transistores construídos com poucos átomos, em breve teremos transistores moleculares; O tamanho de um transistor está na escala de poucas dezenas de nanômetros ou menor.

Fenômenos quânticos se manifestam claramente!! Abre-se a Era do Nanomagnetismo e da Spintrônica.

$1\text{nm} = 10^{-9}\text{m} \rightarrow 10$ átomos em uma linha reta.

Classificação dos Materiais de Acordo com a Condutividade Elétrica

$\sigma \rightarrow$ condutividade elétrica do material, mede a capacidade de transportar corrente elétrica sem sofrer grandes perdas.

De acordo com a condutividade DC os materiais são classificados em:

- Isolantes: $\sigma < 10^{-9}$ S/m. Exemplos: cerâmicas, carbono na forma diamante;
- Condutores: σ fica entre 10^3 e 10^8 S/m. Exemplos: metais, carbono na forma grafite;
- Semicondutores: σ está numa escala intermediária entre condutores e isolantes, ou seja entre 10^{-9} e 10^3 S/m. Um semicondutor intrínseco tem condutividades entre 10^{-4} e 10^{-2} S/m.

Do ponto de vista eletromagnético:

↪ O campo elétrico de uma onda eletromagnética plana uniforme é dado por:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})}, \quad (1)$$

onde

↪ \mathbf{E}_0 é um vetor complexo constante, que indica a magnitude e polarização da onda;

↪ $\hat{\mathbf{n}}$ é o vetor unitário na direção de propagação da onda e $\mathbf{r} = (x, y, z)$;

↪ ω é a frequência angular da onda e k é o número de onda, dado por:

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon_c} = \beta - i\alpha, \quad (2)$$

↪ β é a constante de fase;

↪ α é a constante de atenuação;

↪ Em geral $\mu = \mu_0$ e define-se a permissividade dielétrica complexa:

$$\varepsilon_c = \varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega}, \quad (3)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1} \quad (4)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1} \quad (5)$$

↪ **Isolantes:** $\sigma \ll 1$ e nesse caso $\alpha \rightarrow 0$, ou seja, são relativamente transparentes para as ondas eletromagnéticas, exceção feita às regiões de ressonância do material (absorção de fótons em transições atômico-moleculares ou processos envolvendo fônons).

Bandgap em um bom isolante: $E_G > 3eV$. Somente ondas no espectro ultravioleta ou acima, ou no espectro visível por processos denominados absorção multifótons irão sentir efeitos significativos de atenuação.

↪ **Condutores:** nos metais $\sigma \gg 1$ e nesse caso $\alpha \approx \beta$:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1} \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (6)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1} \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (7)$$

↪ A onda propagando-se no metal é fortemente atenuada, pois sua energia se transfere para os elétrons de condução.

↪ Na incidência entre um meio dielétrico e um meio condutor, a onda será fortemente refletida.

~> Semicondutores:

A condutividade σ é importante mas α não será tão grande quanto em um metal.

~> *Efeito fotoelétrico interno*: o bandgap em semicondutores está usualmente na ordem de 1eV, o que significa que fótons de comprimento de onda visível ou no infravermelho podem arrancar elétrons de valência e jogá-los para a banda de condução.

~> Isso ocasiona aumento de condutividade elétrica por incidência de luz - fotocondutividade.

~> Para frequências cuja energia está bem abaixo de $\sim 1\text{eV}$, o semicondutor apresentará transparência à propagação de ondas eletromagnéticas

~> A propagação apresenta dependência com a temperatura e pressão, alguns aspectos podem ser controlados através de campos elétricos e magnéticos em regime DC ou em alguma frequência particular.

Efeitos de Temperatura sobre a Condutividade

Pelo modelo de Boltzmann:

$$\sigma = \frac{n_q q^2 \tau}{m}$$

onde n_q é a densidade de portadores de carga com carga q e massa efetiva m , τ é o tempo de livre caminho médio (tempo entre colisões).

- Para bons condutores σ diminui na forma $\sigma \propto 1/T$: como o número de elétrons livres é muito grande, n_q não varia significativamente com o aumento de T , mas a agitação da rede cristalina aumenta o número de colisões, diminuindo o livre caminho médio e também τ .

- Para semicondutores, o aumento do número de portadores livres estimulados pelo efeito térmico é apreciável, com elétrons sendo jogados da banda de valência para a condução, sendo mais significativo do que o aumento no número de colisões: $\sigma \propto e^{-\alpha/T}$.

Efeitos de Dopagem e Concentração de Portadores na Condutividade

↪ O semicondutor em alto grau de pureza é dito intrínseco.

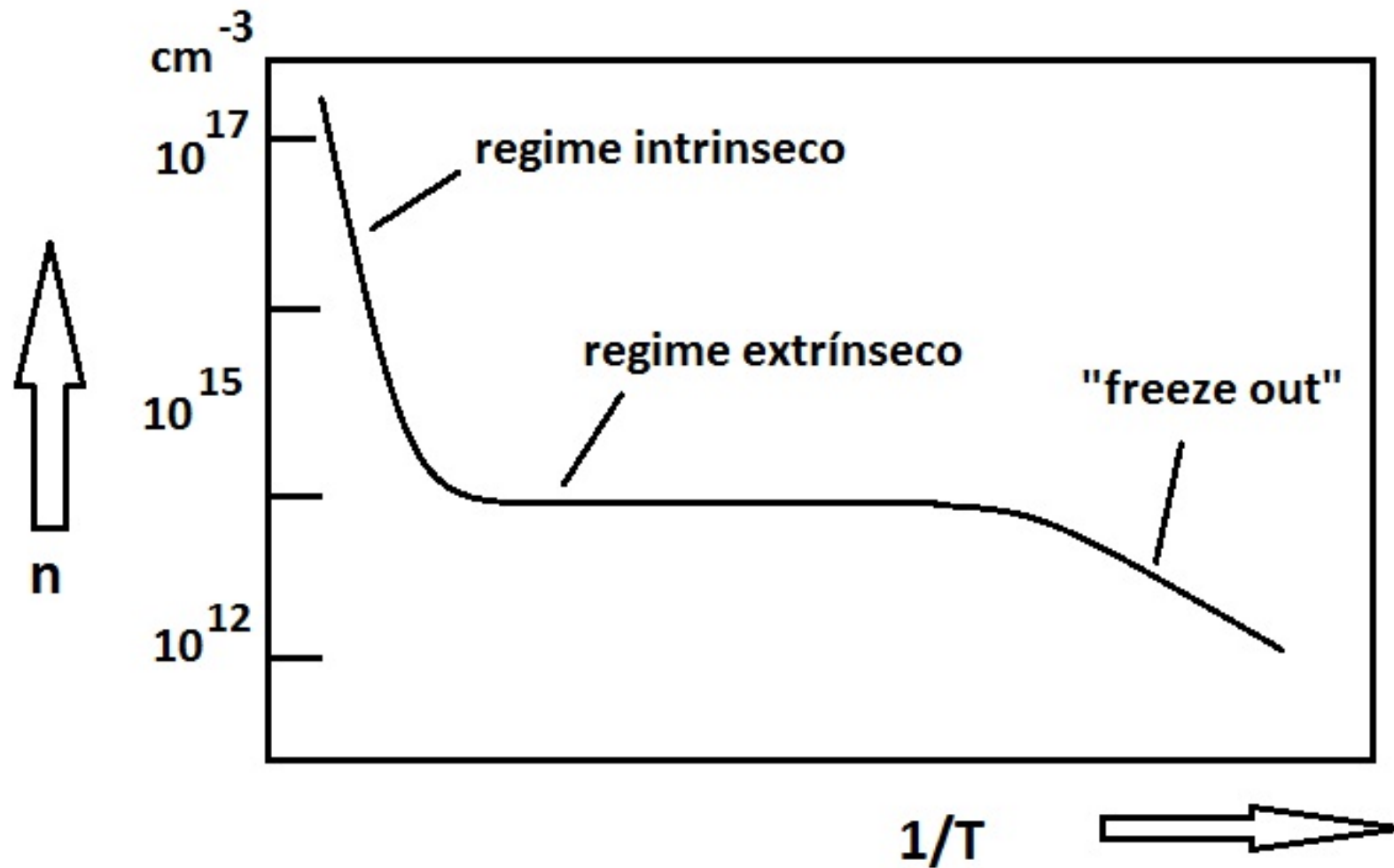
↪ Em linhas gerais, o processo de **dopagem** consiste em substituir alguns átomos do semicondutor intrínseco por outros, denominados átomos de impureza.

↪ Existem dois tipos de impurezas: Tipo P (aceitadores) que criam vacâncias no material e Tipo N (doadores) que acrescentam elétrons na banda de condução do material.

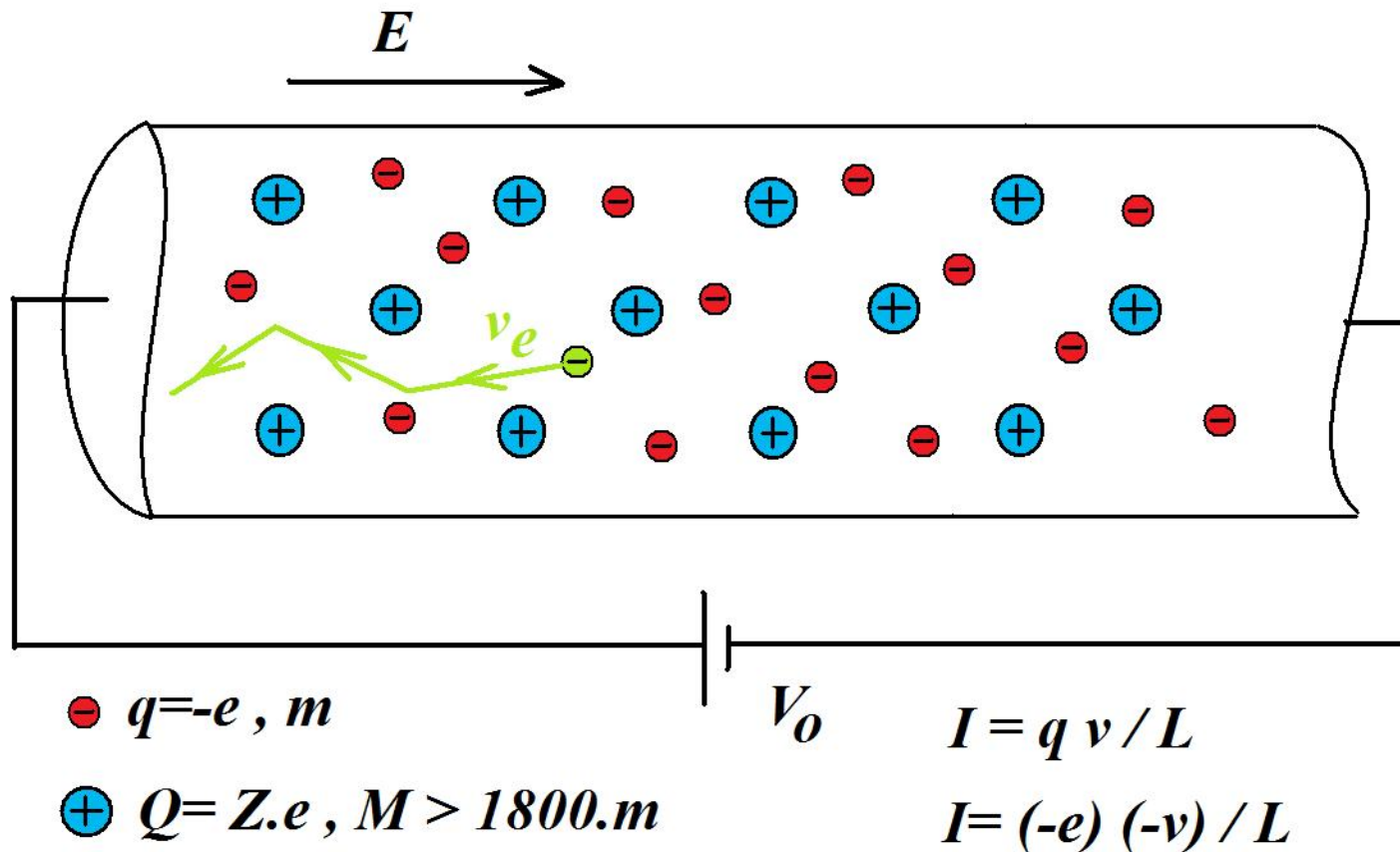
↪ A concentração de impurezas permite controlar a condutividade do semicondutor e o tipo de portador (se vacâncias ou elétrons). A condutividade aumenta com o aumento de concentração, ocorrendo uma transição do material para um estado condutor a partir de certo valor.

↪ Lei de ação de massas: $np = n_i^2$.

Efeito de Temperatura sobre um Semicondutor Dopado:

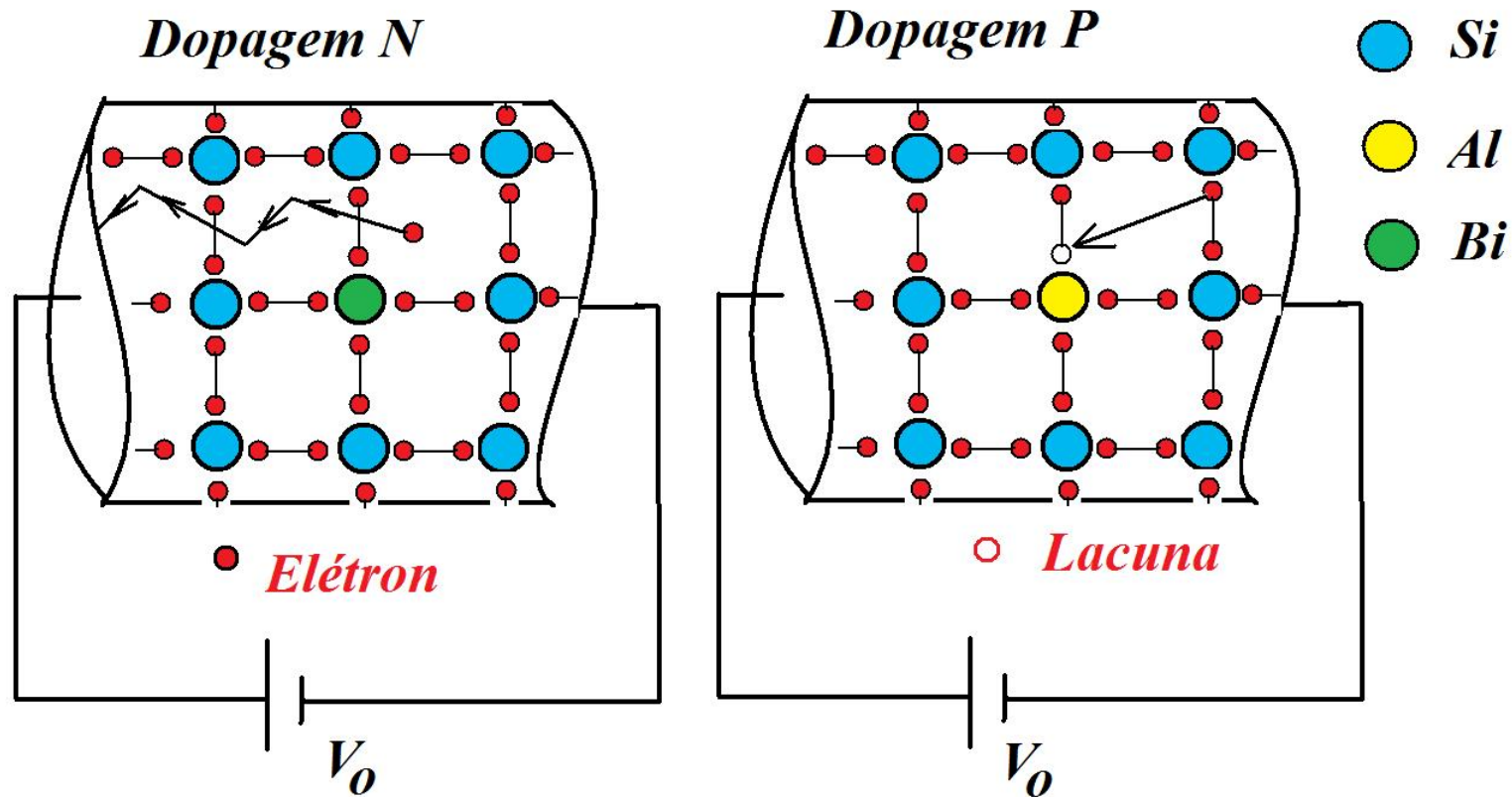


Como é a corrente em um Condutor?



Basicamente, são elétrons em movimento!!!

E em um Semicondutor?



Processos de Dopagem (Tipo P ou Aceitadores e Tipo N ou Doadores) permitem controlar quem participa da corrente. Os portadores de carga são elétrons e lacunas!!!

Materiais Semicondutores:

↪ Dentre todos os semicondutores, os mais importantes são o Silício (Si) e o Germânio (Ge), pertencentes ao grupo IV A da tabela periódica (4 elétrons de valência, ou tetravalentes).

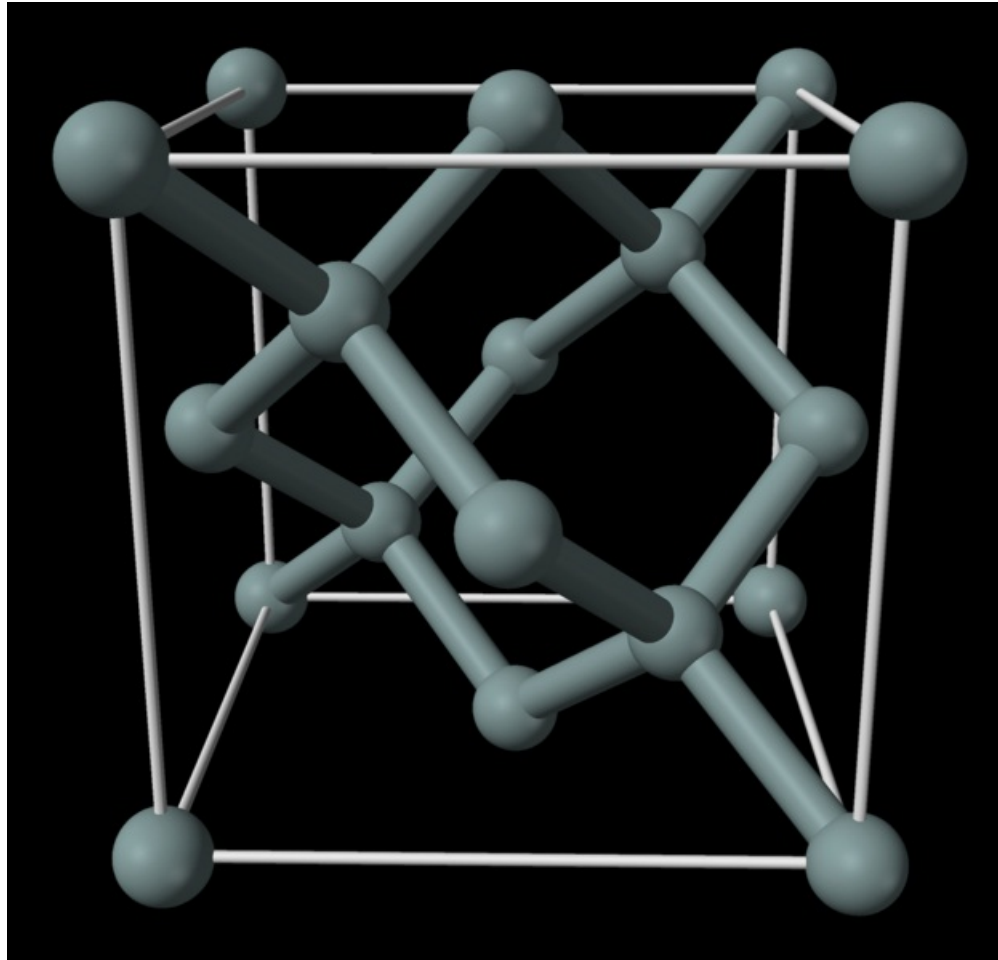
Silício: Bandgap = 1.11 eV; Índice de Refração: $n = 3.50$ para $\lambda \sim 1.5\mu\text{m}$.

- Condutividade elétrica intrínseca: $\sigma(T = 293K) = 10^{-3} \text{ S/m}$
- Possui característica diamagnética. Boas características elétricas e mecânicas. Estrutura cristalina: igual ao diamante.
- Si é o 2º elemento mais abundante na crosta terrestre: $\approx 28\%$ do total. Fácil de ser extraído da sílica (SiO_2) ou minerais silicatos (areia, quartzo).
- Reação de extração em forno de arco elétrico com eletrôdos de carbono a 1900°C : $SiO_2 + C \rightarrow Si + CO_2$
- Número de Massa do Isotopo mais Comum: 28 (92.3%).
- Número Atômico: 14. Configuração eletrônica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$

Germânio: Bandgap = 0.67 eV; Índice de Refração: $n = 4.15$ a $\lambda = 1.5\mu\text{m}$

- Condutividade elétrica intrínseca: $\sigma(T = 293K) = 1 \text{ S/m}$
- Possui característica diamagnética. Boas propriedades de condução, utilizado nos primeiros transistores, alta eficiência para células fotovoltaicas, etc. Estrutura cristalina: igual ao diamante.
- O Ge é bem mais raro que o Si, tem importância na fabricação de fibras ópticas como dopante para a fibra de sílica, além de dispositivos.
- É encontrado na crosta terrestre na proporção de 1.6 ppm, associado a algumas rochas e compostos organometálicos. A extração principal vem da esfalerita, rocha que contém 0.3% de Ge. A produção mundial está na marca de 100 toneladas/ano.
- Número de Massa dos Isótopos mais Comuns: 74 (35%), 72 (27%), 70 (21%) .
- No. Atômico: 32. Config. eletrônica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$.

Estrutura cristalina na forma diamante: duas redes fcc interpenetrantes.



~> Outros Materiais Semicondutores são obtidos através da composição de materiais, que são denominados *Alloys e blendas*:

~> Motivação:

1) melhorar características de condutividade elétrica e variar o valor do bandgap;

2) para fabricação de dispositivos emissores de luz, onde o germânio e o silício não são adequados (tem bandgap indireto);

3) para variar o espectro de emissão/absorção em lasers, leds e fotodetectores.

4) utilização de semicondutores com propriedades magnéticas, para uso em spintrônica;

Principais Combinações:

* **Combinação entre Elementos do Grupo IV A:** tem bandgap ajustável embora em geral indireto, combinação SiC (para emissão no amarelo e no azul), PbS (pedra de galena, primeiro semiconductor utilizado), SiGe (melhora a condutividade e pode-se obter bandgap direto em estruturas denominadas superlattices.)

* **Combinação entre Elementos das Famílias III A e V A:** As (V) e Ga (III) para formar o Arseneto de Gálio (GaAs); InSb (Antimoneto de Índio), GaSb (Antimoneto de Gálio) etc. Em geral possuem bandgap direto, o que os torna úteis em optoeletrônica, para produzir leds e lasers, fotodetectores;

* **Combinação entre Elementos das Famílias II A e VI A:** CdSe (seleneto de cádmio para quantum dots e uso em optoeletrônica), CdS (sulfeto de cádmio, utilizado em fotorresistores e células solares, eletroluminescente pode ser utilizado em lasers de estado sólido), ZnSe (seleneto de zinco, utilizado em laser azul), etc.

* Outras combinações dos elementos do tipo $I - VI$, $IV - V$, $IV - VI$, $I - VII$, $II - V$, sistemas nanoestruturados, etc.

Arseneto de Gálio: Bandgap = 1.424 eV; Índice de Refração: $n = 3.37$ para $\lambda = 2\mu\text{m}$.

~> Excelentes características de condução para altas frequências, podendo ser utilizado até 250GHz.

~> Utilizado em circuitos integrados de microondas, leds infravermelhos, diodos Gunn para osciladores de microondas, diodos lasers e células solares.

~> Não é tão sensível quanto o Si em relação à temperatura e tem bandgap direto.

~> É resistente a danos por irradiação.

~> Estrutura cristalina: blenda de zinco (a mesma do diamante com átomos alternados ...) Os dois tipos de átomos formam duas redes interpenetrantes do tipo cúbico de face centrada (fcc).

A estrutura blenda de zinco: duas redes fcc interpenetrantes. Similar ao diamante, mas com dois tipos de átomos, cada átomo ocupa uma das redes fcc.

