

Física dos Semicondutores e Nanoestruturas

Introdução geral

Considerações prévias-Contextualização

Consideremos uma placa de **cobre**, um pedaço de **silício monocristalino** e um **crystal de quartzo**.

Algumas das diferenças mais marcantes dos sólidos citados são, por exemplo,

★ a cor,

★ o brilho,



dureza e a ductilidade (deformabilidade plástica).



A cor e o brilho são obviamente propriedades que têm que ver com a **absorção e reflexão da luz**

A dureza e a ductilidade são propriedades mecânicas. Têm a ver com a **estrutura atômica e molecular**

São propriedades de carácter electromagnético, ou seja têm que ver com interações entre a radiação electromagnética e a matéria.

Estão associadas ao conceito de ligação química.

★ Estes sólidos possuem também grandes diferenças na sua resistência eléctrica

- o **cobre** é um **metal** típico e por isso um bom condutor.

A sua resistividade, à temperatura ambiente, é da ordem do $\mu\Omega \text{ cm}$.

Se medirmos a resistividade eléctrica a várias temperaturas, verifica-se que ela **aumenta** quando se aumenta a temperatura.

- o **silício** (puro), é um **semicondutor**.

Tem uma resistividade da ordem de $10^5 \Omega \text{ cm}$, à temperatura ambiente.

Se medirmos a resistividade eléctrica a várias temperaturas, verifica-se que esta **diminui** quando se aumenta a temperatura.

- o **quartzo** é um **isolador**.

A sua resistividade é muito elevada.

É da ordem de $10^{14} - 10^{16} \Omega \text{ cm}$, à temperatura ambiente.

? O que é a resistividade, ρ , (ou a condutividade, $\sigma = 1/\rho$)?

Sabemos que a corrente eléctrica significa movimento “ordenado” de portadores de carga (electrões nos metais) -na presença de um campo eléctrico-.

Experimentalmente, num condutor e para campos não muito intensos, é válida a lei de Ohm;

- $$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

J- densidade de corrente; E- campo eléctrico; σ - condutividade

- Esta lei pode também escrever como:
$$\mathbf{J} = nq\mathbf{v}$$

q- carga elementar; n- densidade de portadores por unidade de volume; v- velocidade média dos portadores

O que origina a corrente eléctrica é o campo aplicado.

Este provoca nos eletrões uma velocidade orientada, a qual, no modelo de Drude, que iremos rever, se sobrepõe à velocidade caótica resultante das colisões com os iões positivos do sólido (cuja resultante é nula).

Note-se que, segundo a lei de Ohm, as cargas não são aceleradas.

O campo eléctrico equilibra o atrito das colisões e a velocidade média dos eletrões mantém-se constante.



- Qual significado físico de n (número de cargas por unidade de volume); como se determina?
- Qual significado físico de v (velocidade média dos electrões no sólido, sob a acção do campo exterior); como se determina?

? Qual significado físico de n (número de cargas por unidade de volume); como se determina?



Implica a escolha de um modelo

Podemos, por exemplo, admitir que nos sólidos existem electrões livres e que **n representa o número de electrões livres por unidade de volume.**

Assim, para explicar os valores típicos de resistividade:

- o cobre teria muitos electrões livres por unidade de volume,
- o silício teria muito menos e
- os sólidos isoladores, como o quartzo, não teriam quase nenhuns.

? Serão os eletrões, de facto, livres?

Se o fossem, seriam acelerados, e a condutividade aumentaria com o tempo.

($F=ma$; $F=qE$; $v=v_0+at$)

Consideremos, então que n é o número de eletrões que de uma maneira ou de outra, se podem mover (e não propriamente livres).

? Como medir ou calcular esse número?

Por outro lado sabemos que nos metais, como o cobre, ρ aumenta com T , enquanto que nos semicondutores, como o silício, ρ diminui com T .

? Então será que o número de eletrões varia com a temperatura?

? Ou será a velocidade que varia com a temperatura?

? Ou ambos?

? De que modo?

Introdução: Propriedades dos materiais

Algumas propriedades importantes dos Materiais:

- podem ou não conduzir **corrente eléctrica** (metais ou isolantes);
- conduzem **calor** com diferentes graus de eficiência (condutividade térmica);
- **condutividade térmica e condutividade eléctrica** estão fortemente correlacionadas;
- a variação do **calor específico com a temperatura** é muito diferente para metais e isolantes;
- metais -**brilham** e os isolantes não.
- alguns materiais apresentam **propriedades magnéticas**;

Experimentalmente medem-se propriedades macroscópicas, como sendo:

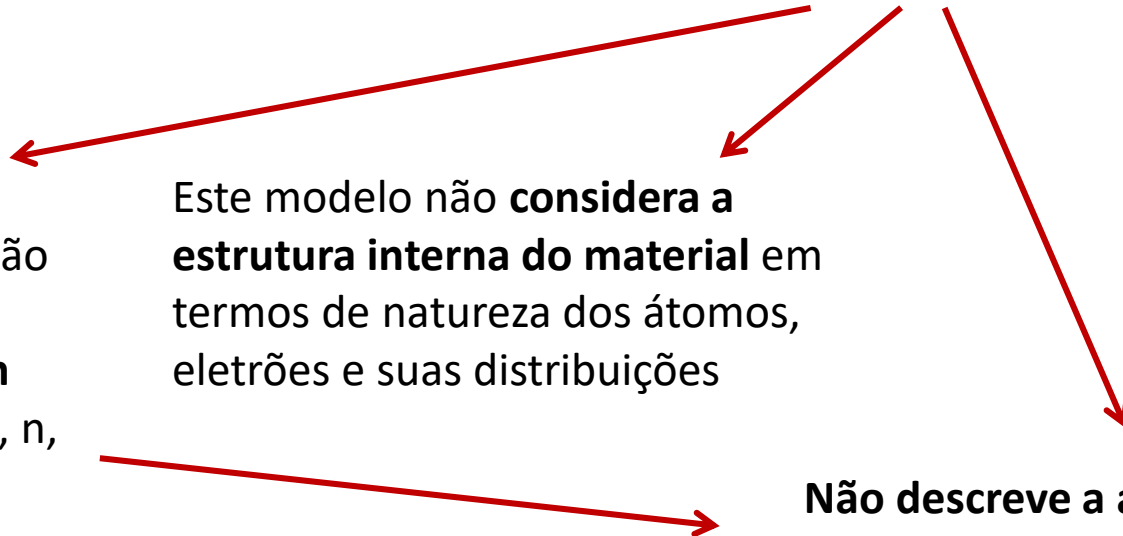
- módulo de elástico;
- condutividade eléctrica;
- condutividade térmica;
- índice de refração e coeficiente de absorção; ...

Estas propriedades são normalmente bem explicadas pelo **modelo clássico contínuo do sólido**

Assume que as propriedades são uniformes, obtendo-se **um valor** para σ ; K , n , ...

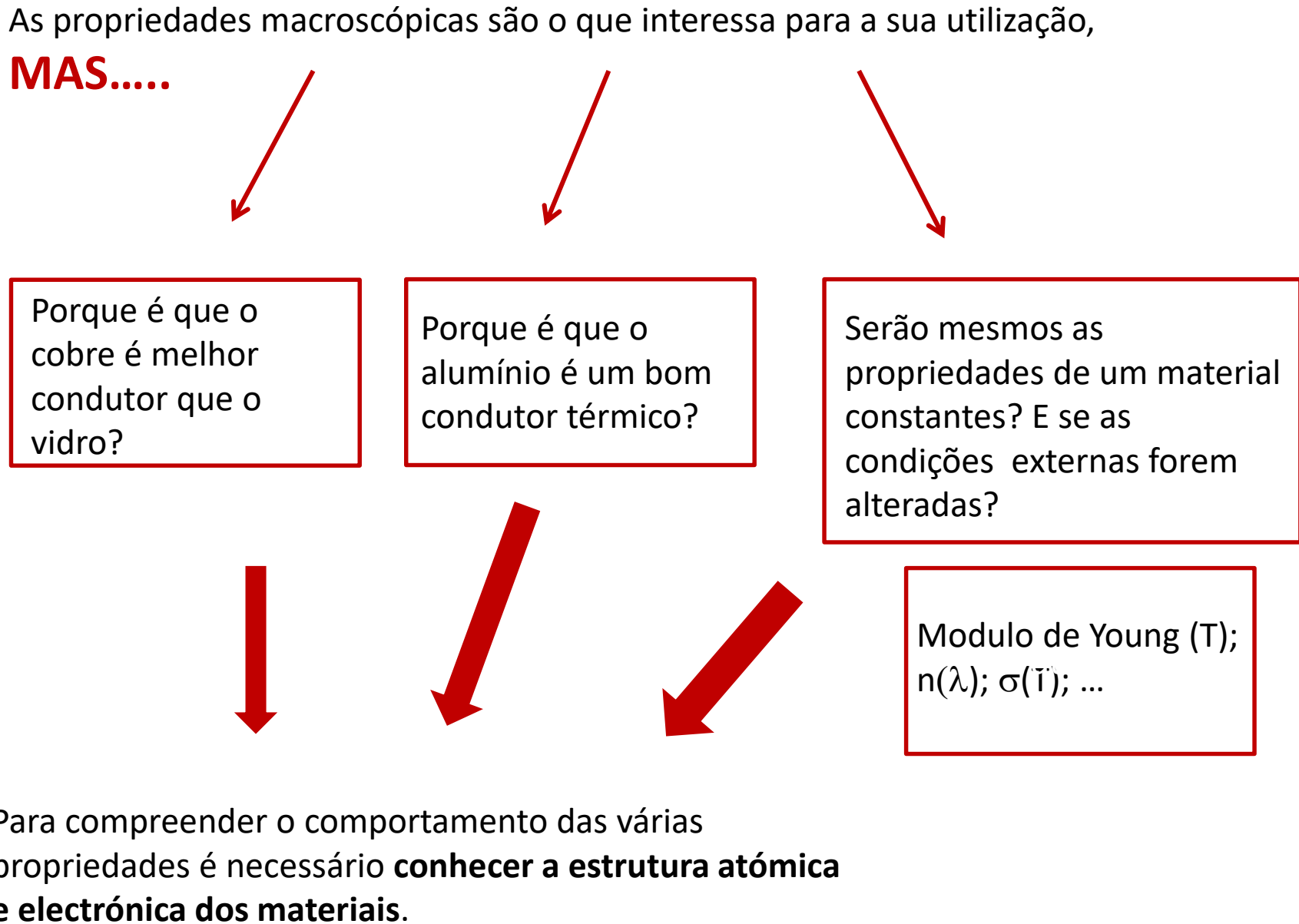
Este modelo não **considera a estrutura interna do material** em termos de natureza dos átomos, eletrões e suas distribuições

Não descreve a anisotropia das propriedades



As propriedades macroscópicas são o que interessa para a sua utilização,

MAS.....



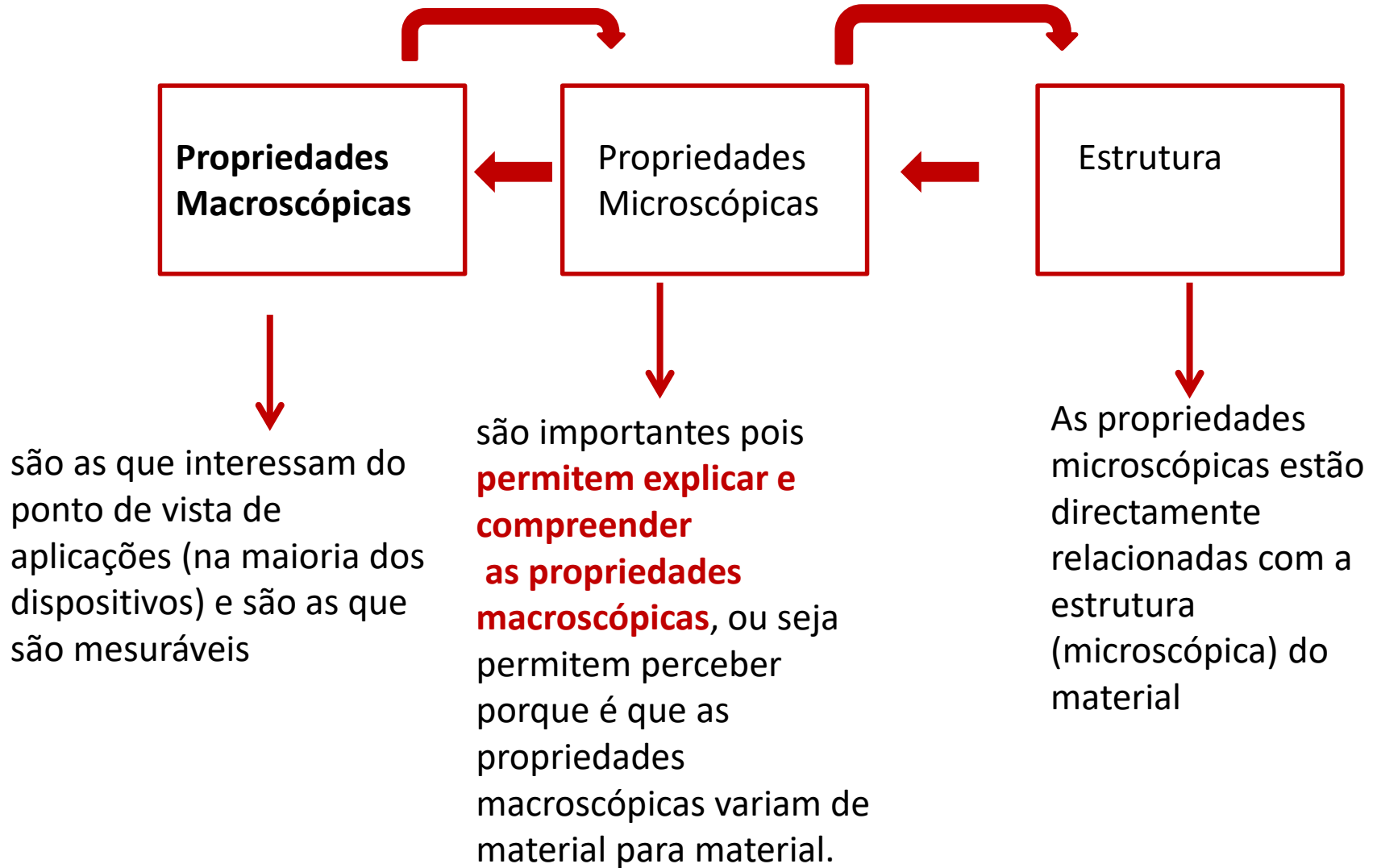
Porque é que o cobre é melhor condutor que o vidro?

Porque é que o alumínio é um bom condutor térmico?

Serão mesmas as propriedades de um material constantes? E se as condições externas forem alteradas?

Modulo de Young (T);
 $n(\lambda)$; $\sigma(\bar{\Gamma})$; ...

Para compreender o comportamento das várias propriedades é necessário **conhecer a estrutura atómica e electrónica dos materiais.**



Como se quantificam as propriedades Materiais?

Eléctricas



Condutividade eléctrica



diferencia um condutor, isolador; semiconductor

Ópticas



Índice de refração e coeficiente de absorção



descrevem o comportamento óptico de um material

Mecânicas



Prop. elásticas e plásticas



Módulo de Young

Térmicas



Condutividade térmica



diferencia um condutor, isolador

Resistividade varia muito:

$$1/\sigma = \rho$$

$$\rho_{\text{diamante}} = 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho_{\text{Al}} = 2.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho_{\text{Si}} = 2.3 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$$

$n = c/\text{velocidade da luz no material}$

$n@500\text{nm}$

$$n_{\text{Al}} = 1.2; k = 12.4$$

$$n_{\text{Cu}} = 0.44; k = 8.5$$

$E = \text{Stress aplicado/strain resultante} = \sigma/\epsilon$

$$E_{\text{Al}} = 7 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

$$E_{\text{aço}} = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$E_{\text{Fe}} = 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

K varia :

$$K_{\text{Al}} = 237 \text{ W}/(\text{mK})$$

$$K_{\text{vidro}} = 0.8 \text{ W}/(\text{mK})$$

$$K_{\text{diamante}} = 1000 \text{ W}/(\text{mK})$$

Q1: As propriedades macroscópicas dos materiais estão relacionadas umas com as outras?

Ou seja:

Existe relação entre propriedades eléctricas, térmicas e ópticas?

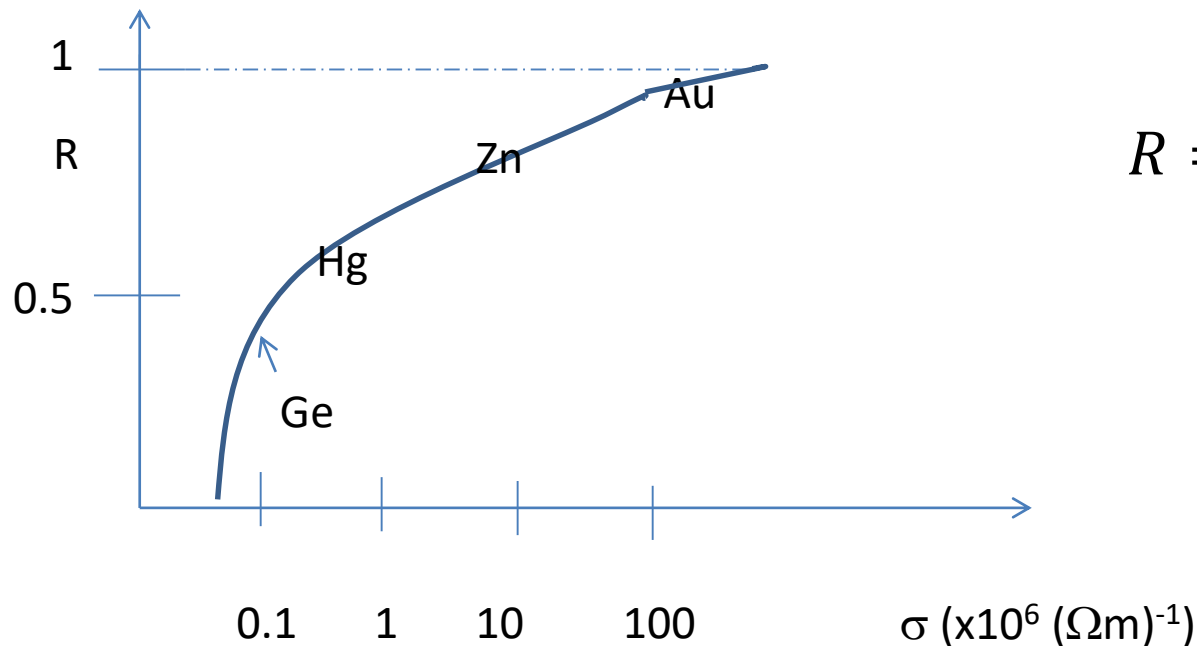
Sim, existe um mecanismo comum entre várias propriedades: regra geral um material bom condutor térmico também o é electricamente e regra geral também é opticamente bom.

R1: Lei de Hagen-Rubens

Relaciona as propriedades **elétricas e ópticas** num material

A reflectividade, R , é a razão entre a intensidade de luz reflectida e a intensidade de luz incidente

É uma prop. muito importante para a escolha de materiais por ex. para painéis solares.
Parâmetro importante para $\lambda > 3\mu\text{m}$ ($R \approx 1$)



$$R = 1 - 2\sqrt{\frac{4\pi\epsilon f}{\sigma}}$$

Conductividade elétrica

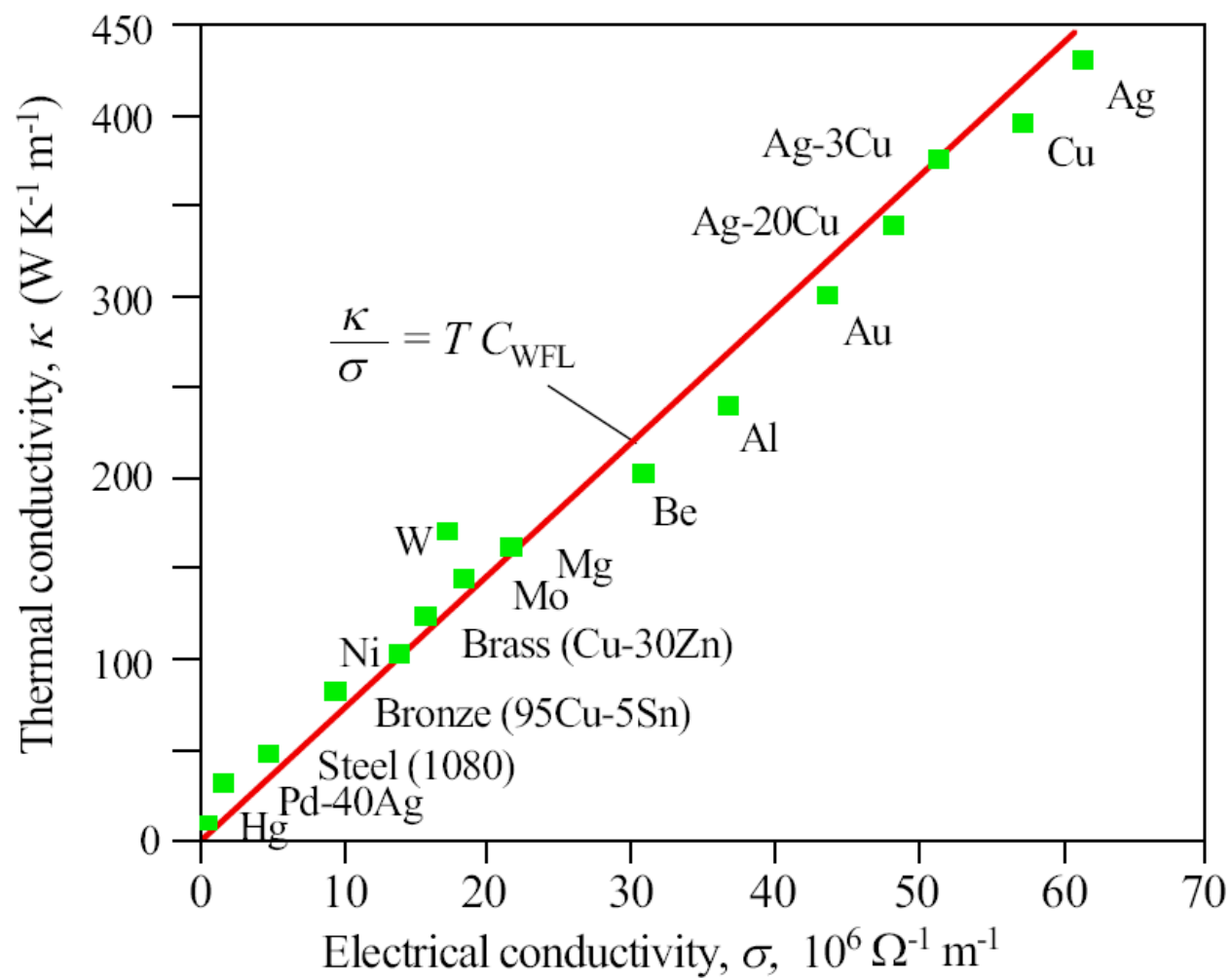
R2: Lei de Wiedeman-Franz

Relação entre as propriedades **eléctricas e térmicas** num material (**metal**)

$$\frac{K}{\sigma x T} = 2.4 \times 10^{-8} J \Omega K^{-2} s^{-1}$$

Bom condutor eléctrico é geralmente bom condutor térmico, pois se K aumenta, então σ também tem que aumentar (para uma dada T)





Physics of Semiconductor Nanostructures

```
graph TD; A[Physics of Semiconductor Nanostructures] --> B[Why study the physics? What's interesting physics? How to study the physics? Understand better the physics, then...]; A --> C[What's 'structure'? What's 'nano-scale'? Why nanostructures?]; A --> D[What's SC? Why SC?];
```

Why study the physics?
What's interesting physics?
How to study the physics?
Understand better the
physics, then...

What's "structure"?
What's "nano-scale"?
Why nanostructures?

What's SC?
Why SC?

Metal, Insulator and Semiconductor

	Conductor (Cu, Ag..)	Semiconductor (Si, GaAs..)	Insulator (SiO2,..)
Resistivity ρ (Ohm.cm)	$10^{-6} \sim 10^{-2}$	$10^{-2} \sim 10^9$	$10^{14} \sim 10^{22}$

$$\rho_{metal} < \rho_{SC} \ll \rho_{ins}$$