

# Tecnologia e Aplicações de Semicondutores

## 1<sup>o</sup> semestre/2024

### Semicondutores – “história”

Dr. Adenilson José Chiquito

Departamento de Física  
Universidade Federal de São Carlos



A SEMI-CONDUCTOR

## Estrutura da disciplina

“Dar noções aprofundadas dos fenômenos físicos envolvidos na física dos semicondutores; dar noções básicas sobre os diferentes tipos/métodos de processamento, envolvidos na fabricação de amostras semicondutoras; dar noções dos tipos de dispositivos semicondutores e as suas aplicações em ciência de tecnologia; propiciar aos alunos, a oportunidade de desenvolver raciocínio crítico em relação ao conteúdo proposto, através de exposições e abordagens ilustrativas do mesmo” (*texto extraído do Prograd Web*)

### Tópicos:

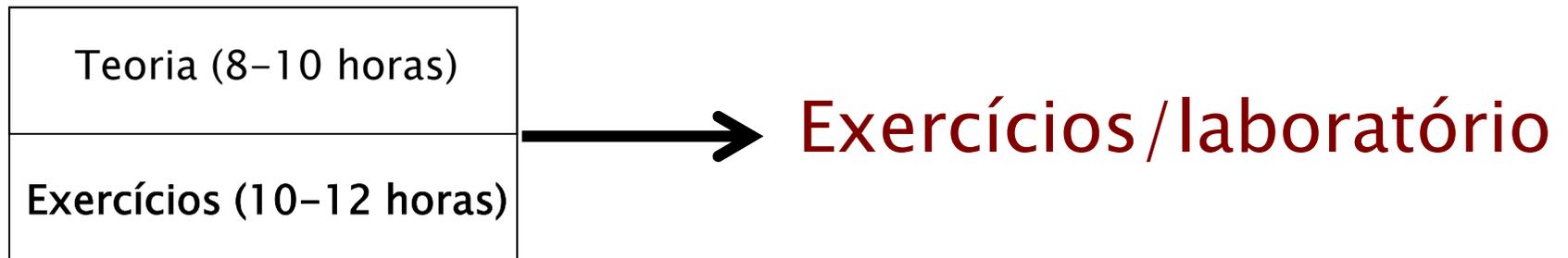
- 1 – Estrutura cristalina; Teoria de bandas; Junção p-n; Junção metal semicondutor; Corrente na junção; Capacitância da junção; propriedades ópticas; Nanoestruturas semicondutoras.
- 2 – Crescimento de amostras; junção MS – preparação e caracterização dos contatos; fabricação de um dispositivo (litografia); caracterização elétrica de dispositivos

# Tecnologia e Aplicações de Semicondutores: quintas (08h - 12h)

Livros recomendados:

- 1) Física de Materiais e Dispositivos Eletrônicos ,Sergio M. Rezende (UFPE)
- 2) Introdução à Física do Estado Sólido, Charles Kittel, 8<sup>a</sup>. Edição, LTC Editora
- 3) Physics of Semiconductor Devices, S. M. Sze (Wiley)
- 4) Fundamentals of Semiconductors, Peter Yu e Manuel Cardona (Springer)

## Organograma



**Avaliação: 0.5[MÉDIA DAS LISTAS]+ 0.5[NOTA DA MONOGRAFIA]**

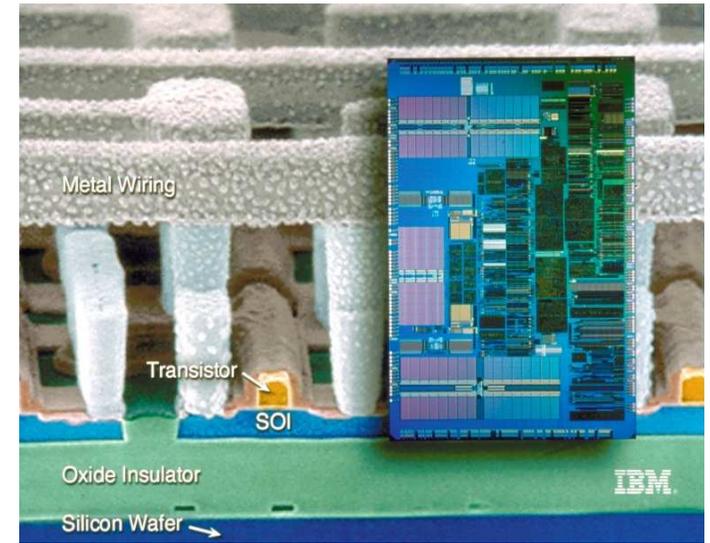
Exercícios, monografia: atividades em grupo

# Motivação e Introdução “histórica”

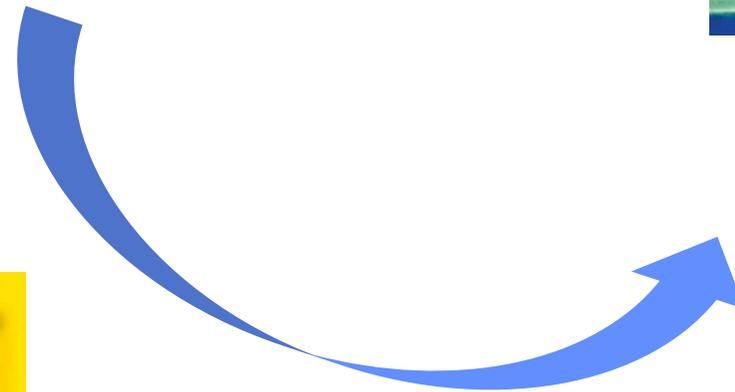


Wafers de 200 mm Silício

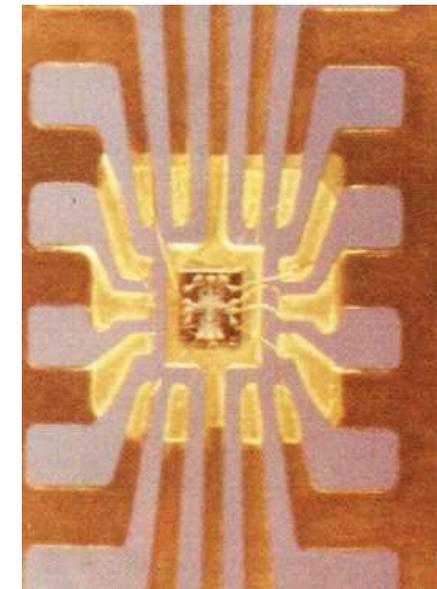
Dispositivo final



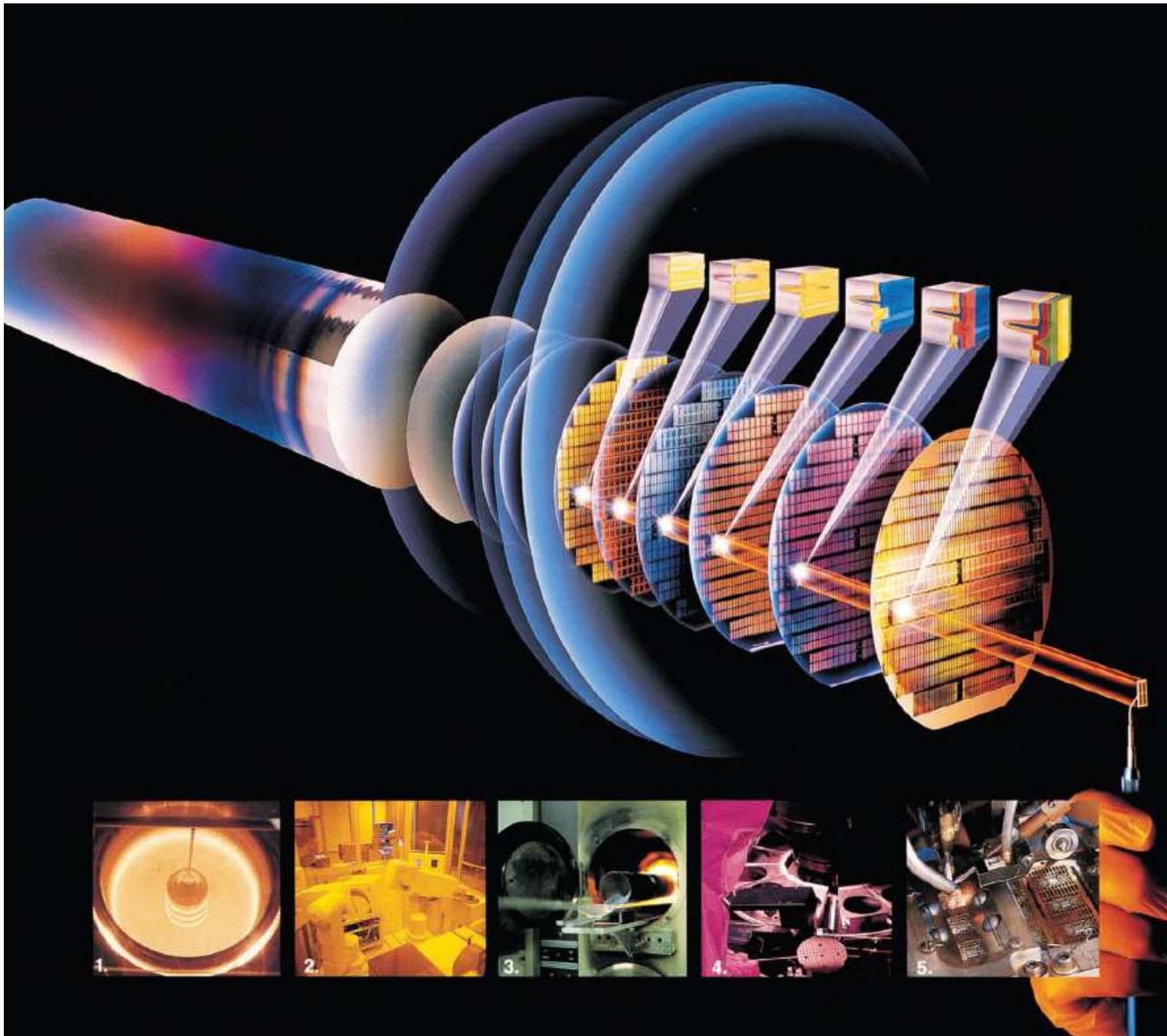
Processamento



Junções

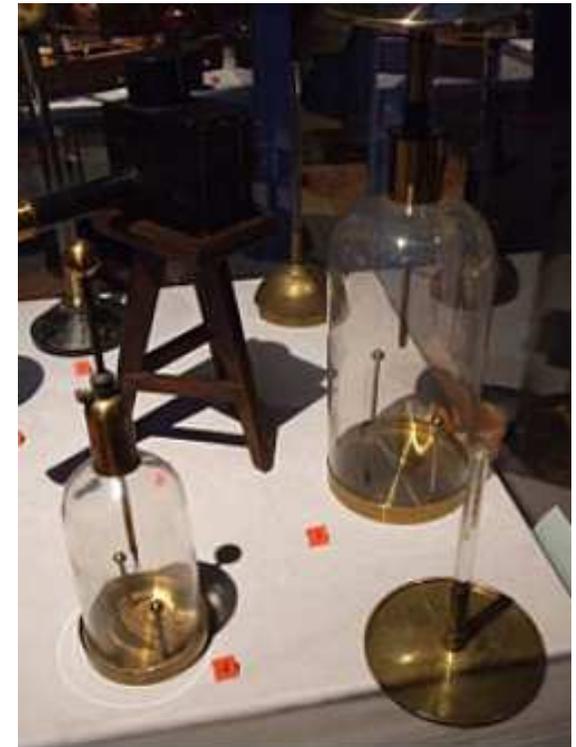


Contatos elétricos



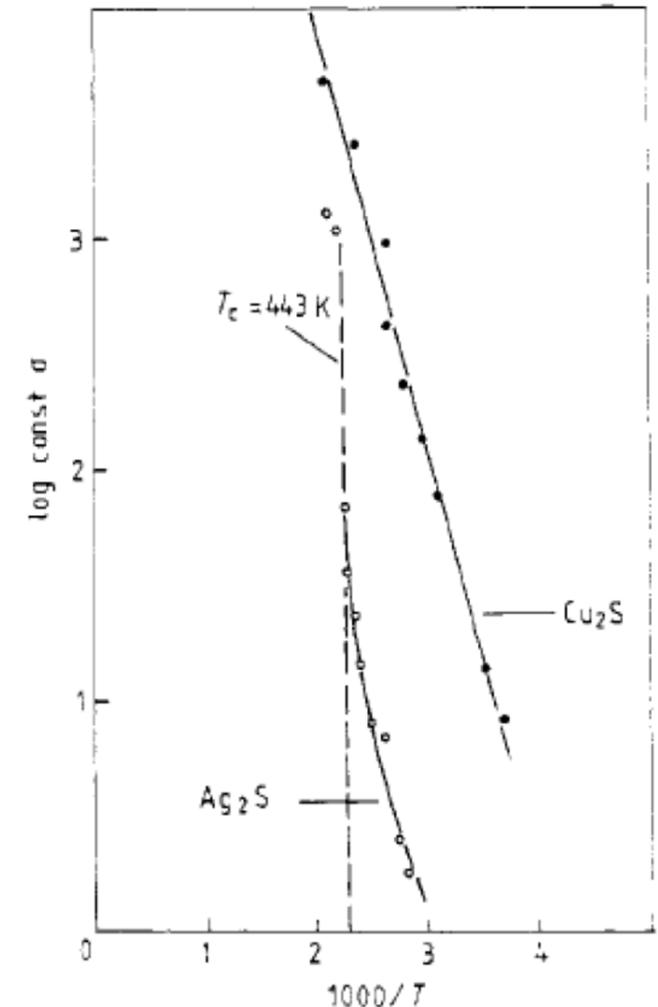
## Um pouco da história dos semicondutores

- Os materiais semicondutores foram os materiais que até hoje tiveram (e têm) o maior impacto (e mensurável) em nossa sociedade !!!
- Primeiros estudos sobre condução de eletricidade em sólidos e líquidos: Stephen Gray (1666/1667-1736, Londres e Cantebury);
- A primeira vez que a ideia “semicondutor” foi usada ocorreu numa seção da *Royal Society* em 1782 na qual foi lida uma comunicação de Alessandro Volta sobre “materiais de natureza semicondutora”: experimentos para medir a velocidade na qual um **eletrômetro** se descarrega colocando-o em contato com diversos materiais. Metais descarregam-se instantaneamente, semicondutores lentamente e isolantes não se descarregam. Basicamente, a distinção de três tipos básicos de materiais, em relação à condução, estava feita;



➤ O comportamento da condutividade em metais foi estabelecida por Humphrey Davy (1821): *“o poder de condutividade dos corpos metálicos varia com a temperatura, e é mais baixo, em uma razão inversa, a medida que a temperatura aumenta”*;

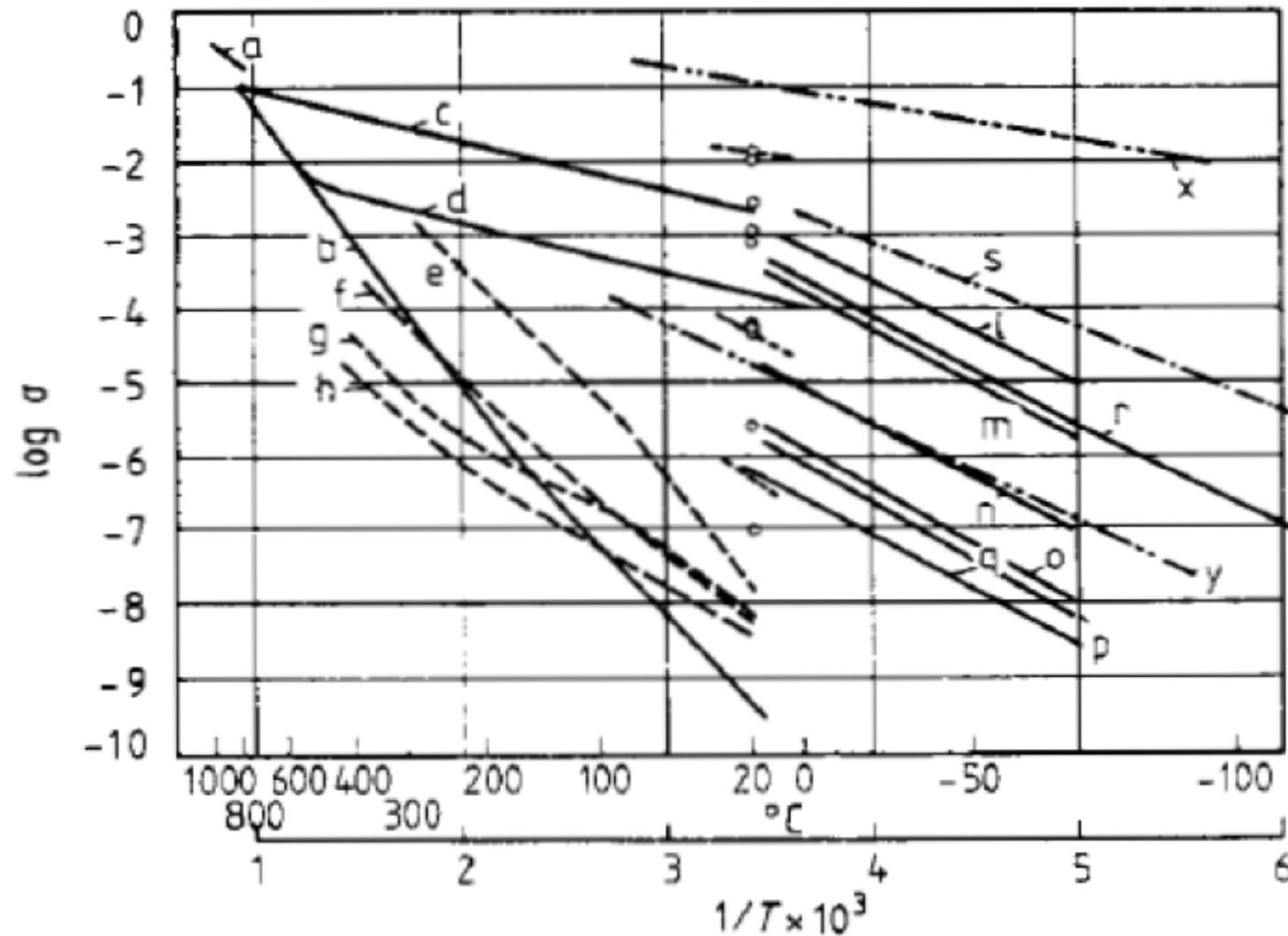
➤ **Michael Faraday (1833)** estende os trabalhos de Davy para uma grande variedade de compostos, observando que vários desses compostos apresentam uma variação da condutividade com a temperatura oposta aquela observada por Davy. Em particular, o  $\text{Ag}_2\text{S}$ , que em temperatura ambiente é um condutor pobre mas em aproximadamente  $175\text{ }^\circ\text{C}$  tem a condutividade aumentada rapidamente para valores próximos aos dos metais. Infelizmente, Faraday não publica nenhum resultado quantitativo ou gráficos;



G Busch, Eur. J. Phys. 10, 254 (1989)

- Detalhe interessante: Faraday buscava caracterizar diferenças entre a condutividade de materiais em diferentes fases (líquido/sólido) e a maioria dos materiais estudados era **iônico**, não **eletrônico**! Apenas 100 anos depois mostrou-se que realmente o  $\text{Ag}_2\text{S}$  era eletrônico!!
- Experimentos com materiais como o  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$  e  $\text{Ag}_2\text{S}$  foram os primeiros a mostrar que a condutividade poderia variar de forma diferente de metais: *nestes materiais, a condutividade aumentava com a temperatura e dependia da qualidade do material!*
- Alguns problemas apareceram nos experimentos seguintes: a condutividade sempre aumentava com a temperatura mas parecia que as cargas poderiam ser positivas ou negativas (mas eram elétrons!!!); não havia reprodutibilidade nos experimentos que claramente dependiam da qualidade das amostras (defeitos, impurezas);

➤ Dessa forma, não fazia sentido estudar semicondutores pois não havia controle e as propriedades observadas não eram intrínsecas pois dependiam das amostras:



*“Não se deve trabalhar com semicondutores, são inúteis; quem pode dizer se eles realmente existem?”*

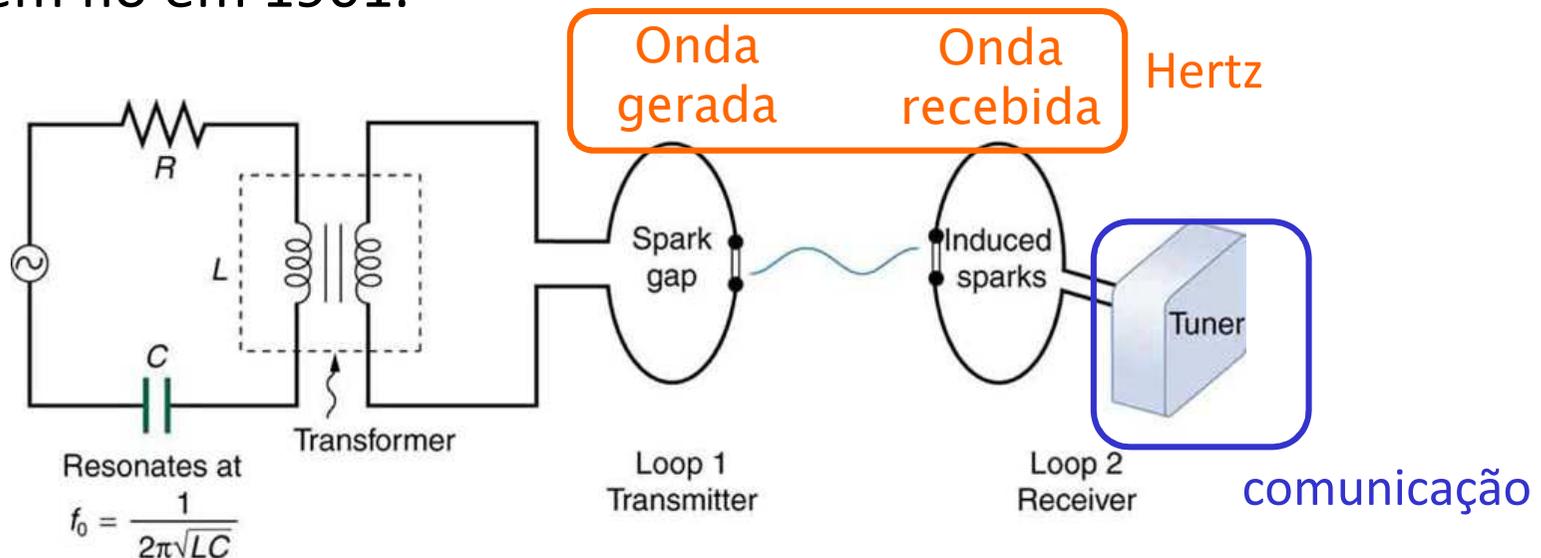
**Wolfgang Pauli em carta para Rudolf Peierls em 1931 !!!**

Gudden B., Elektrizitätsleitung in Kristallisierten Stoen unter Ausschluss der Metalle, Ergeb. Exakten naturwiss. 3, 116 (1924).

➤ Desenvolvimentos adicionais tiveram que esperar até os anos 1920-1930 com o desenvolvimento da teoria quântica dos sólidos;

➤ Para contextualizar, Modelo de Drude/Ohm, 1900:  $\sigma = \frac{nq^2\tau}{m}$

➤ Invenções como o telégrafo/telefone/**telégrafo sem fio/rádio** e a possibilidade de comunicação a distância era uma realidade após as descobertas de Hertz em 1888 e aplicação delas por Marconi no telégrafo sem fio em 1901.



➤ As experiências de Hertz mostraram as possibilidades de produzir/enviar/detectar um sinal eletromagnético através do espaço; nessa época o sinal seria o que chamamos de **estática** hoje em dia

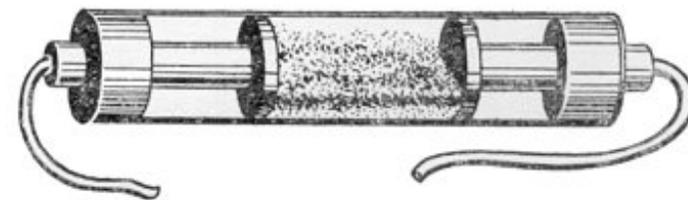
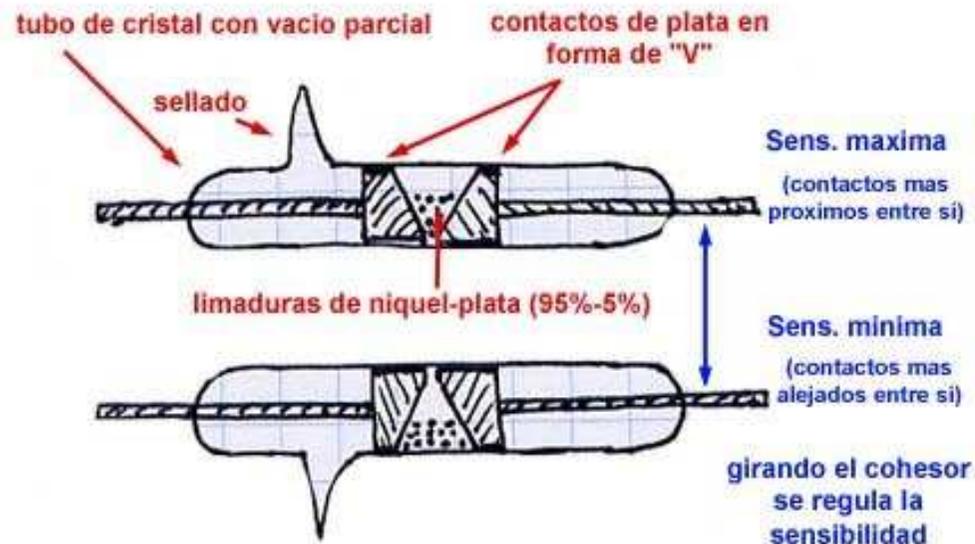
➤ **Tecnologia:** como tornar a transmissão de ondas útil para *transmitir* informações, ou seja, como *receber/decodificar* um sinal?

A resposta é a detecção nas informações na onda!

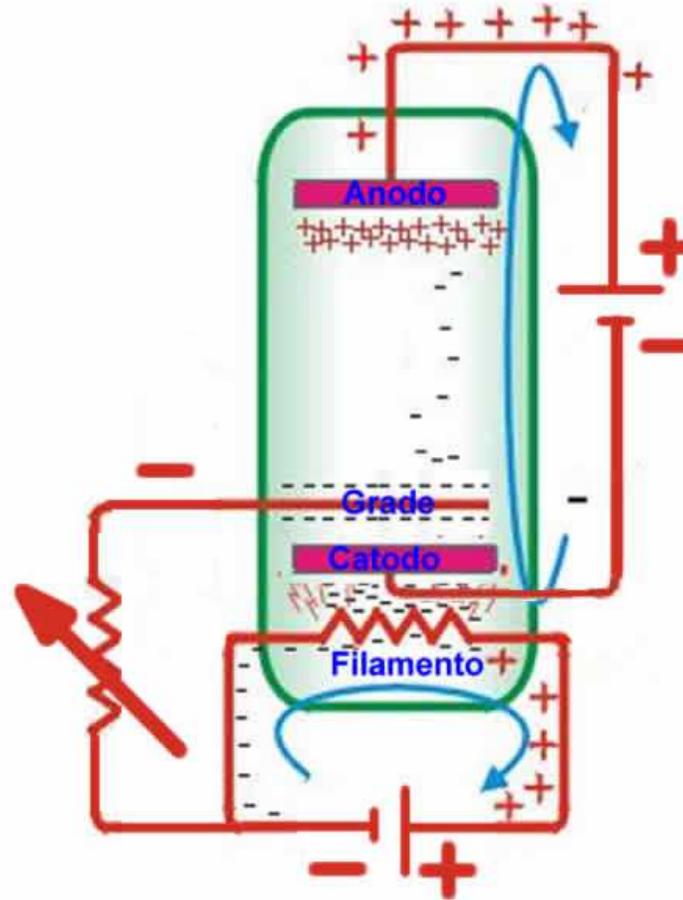
Solução da época:  
o *cohesor* de Branly/Marconi,  
um tubo de vidro com limalha  
de ferro ou níquel !!!!



Cohesor "Marconi" de níquel-plata, de sensibilidade ajustable



- Coesor funcionava, mas não era funcional!
- Seguiu-se o advento das válvulas que nada mais são que “**lâmpadas**” com um terceiro terminal de controle (Lee de Forest, 1906)



➤ O impulso dado ao estudo de semicondutores veio na sequência do desenvolvimento das telecomunicações: telégrafo, telefone, rádio, televisão... (1860 - 1960) mas inicialmente como curiosidade apenas....

*Bell Telephone and Telegraph Company*: como expandir as linhas telefônicas para o oeste norte-americano (1900-1930)?

**Problema**: grandes distâncias geram grandes perdas nos fios e impossibilidade de comunicação efetiva!

**Solução 1**: amplificadores (valvulados) → alto custo energético, instabilidade mecânica e elétrica e manutenção constante

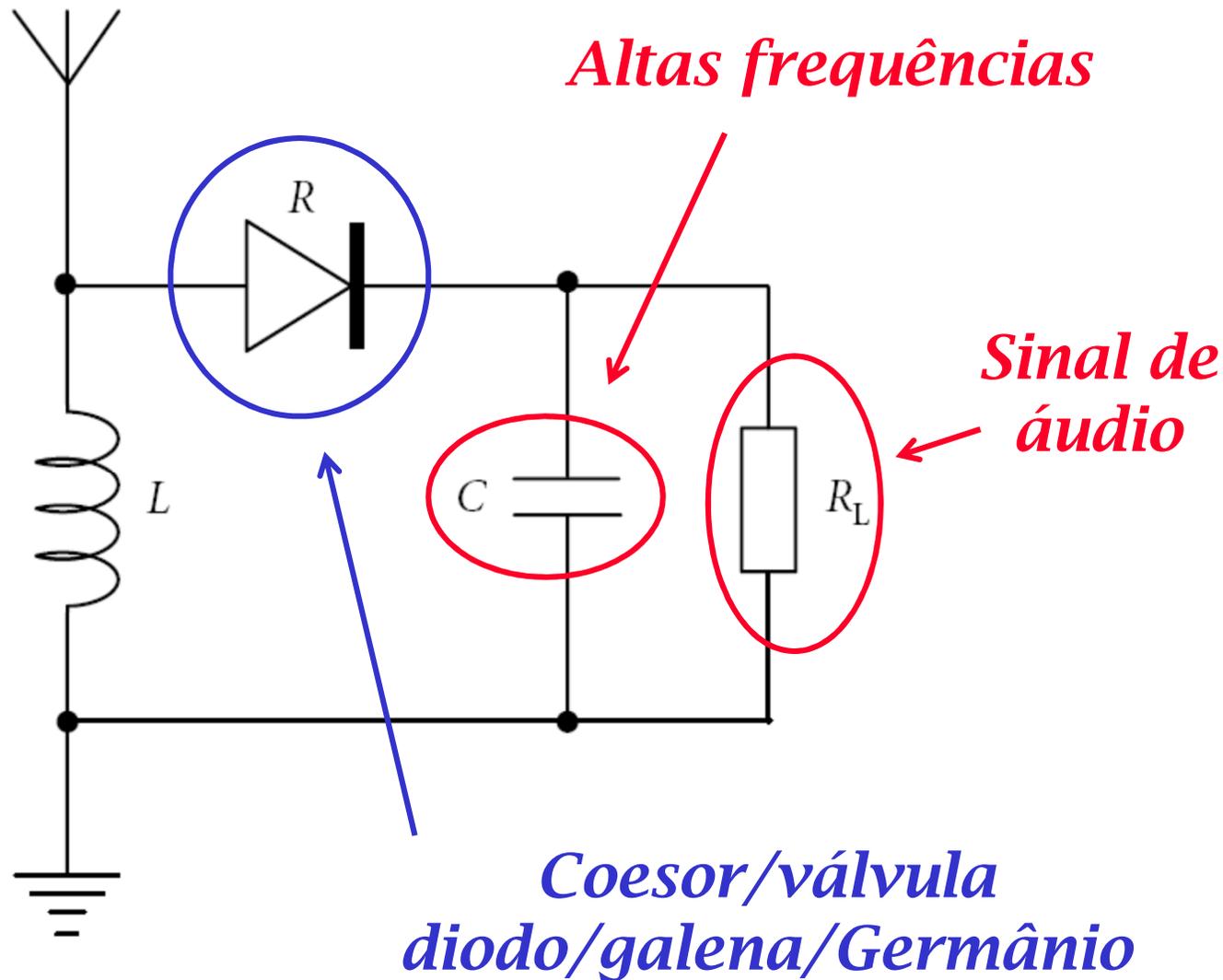
**Solução 2**: dispositivos construídos com cristais semicondutores: “válvulas” de **estado sólido**

➤ Em 1874 Carl F. Braun já havia descrito um fenômeno chamado **retificação** de corrente em dispositivos feitos com contatos metálicos em cristais naturais como a Galena e a Pirita: **a corrente elétrica era maior numa direção do que na direção contrária no mesmo dispositivo!**

➤ Semelhança com o coesor? Utilidade para isso??

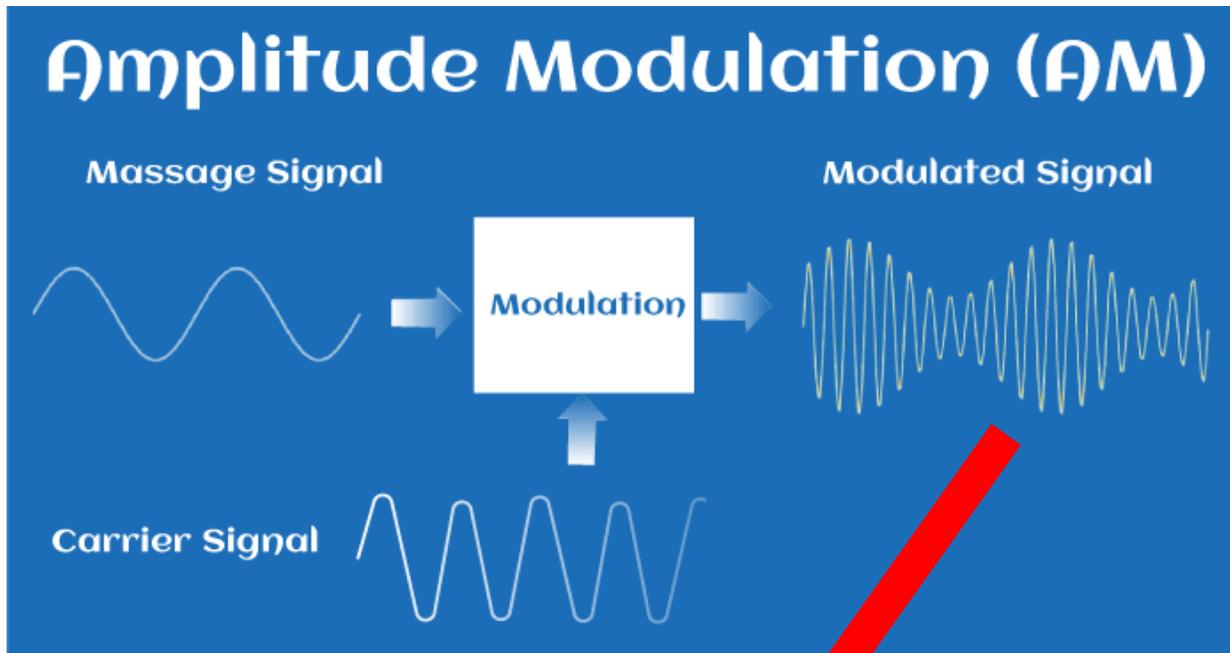
**Sim e Sim: detecção de ondas eletromagnéticas!**

➤ A retificação de corrente alternada e a detecção de ondas eletromagnéticas

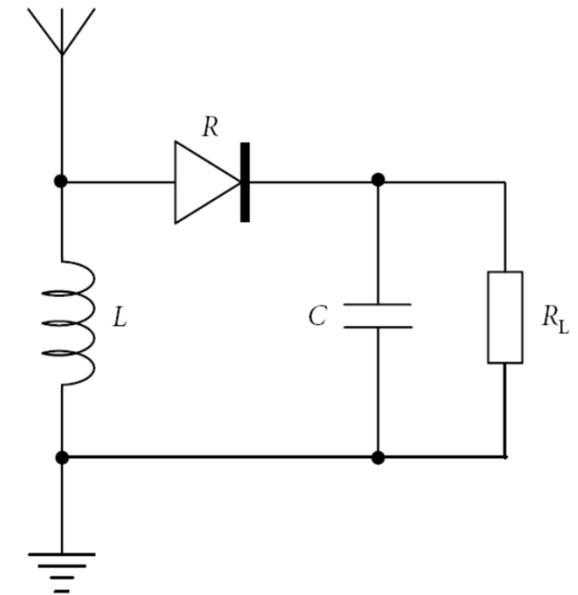
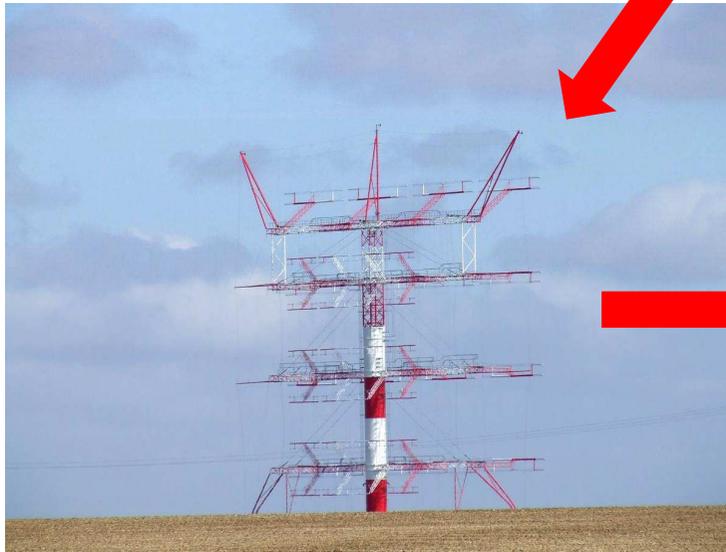


Detector de ondas eletromagnéticas ou rádio

➤ A retificação de corrente alternada e a detecção de ondas eletromagnéticas

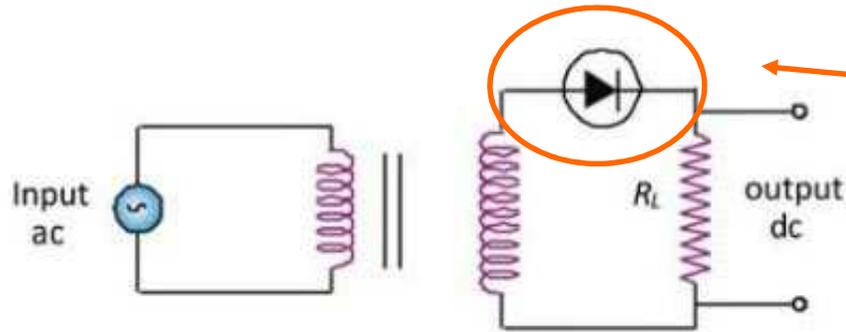


Geração e recepção de um sinal de rádio

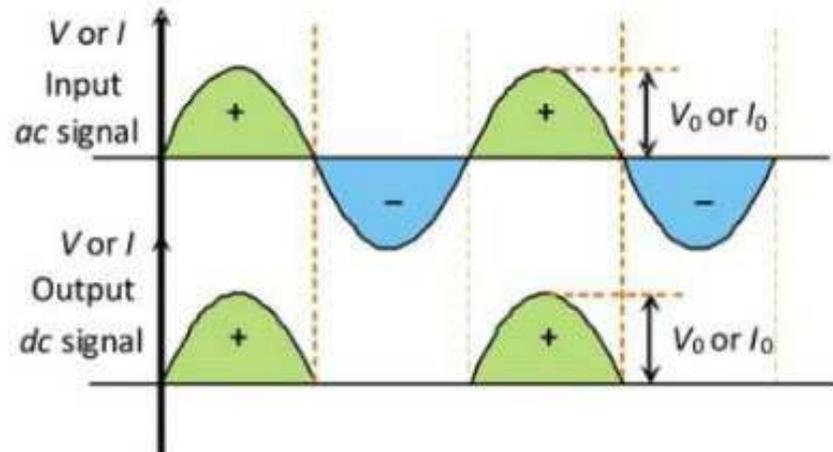


➤ A retificação de corrente alternada e a detecção de ondas eletromagnéticas

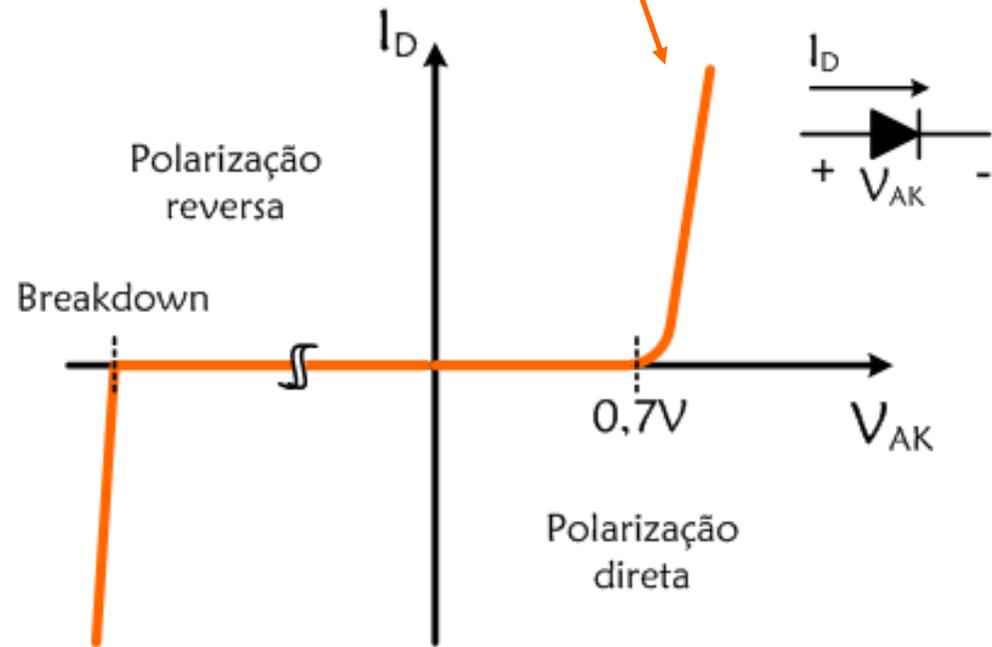
circuito prático



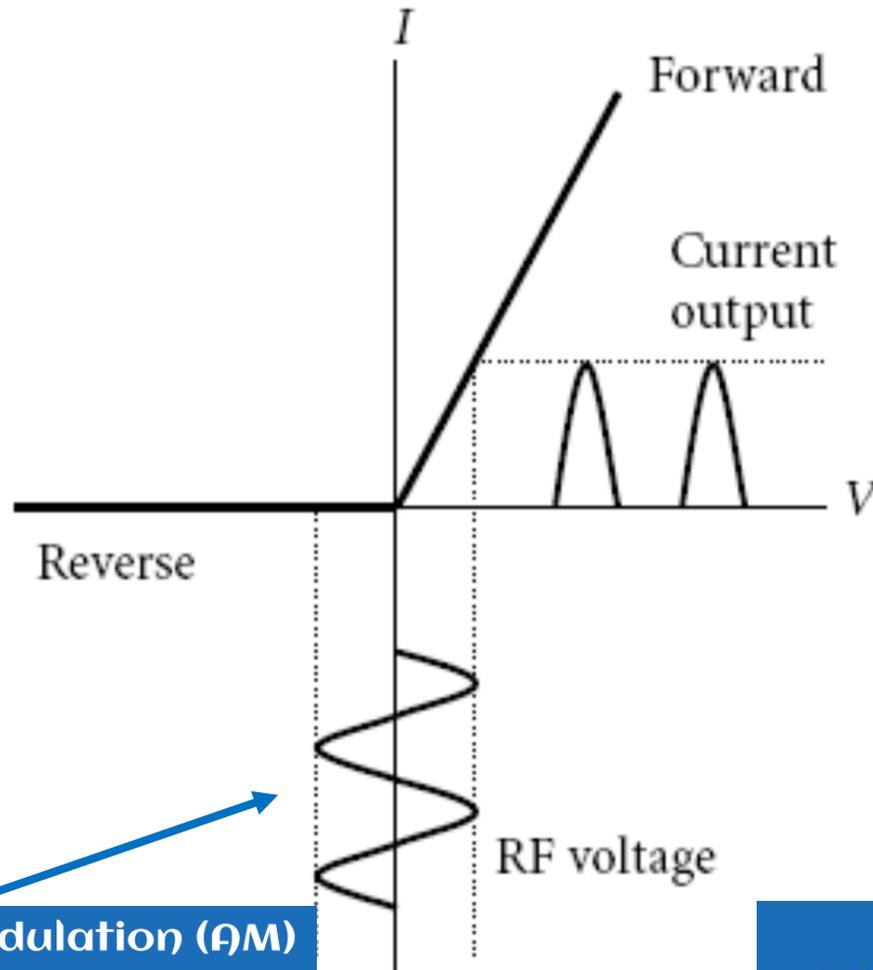
“retificador”



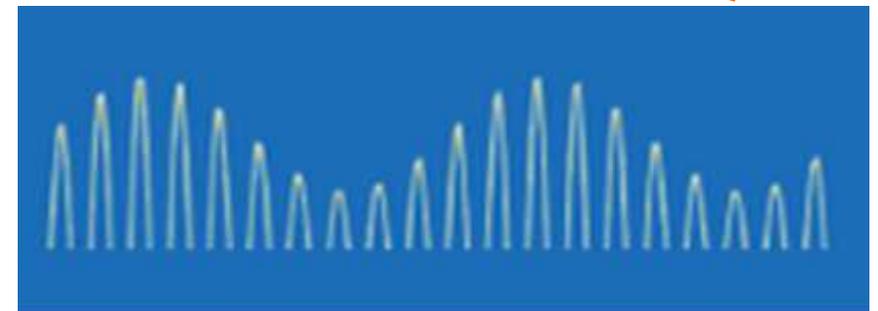
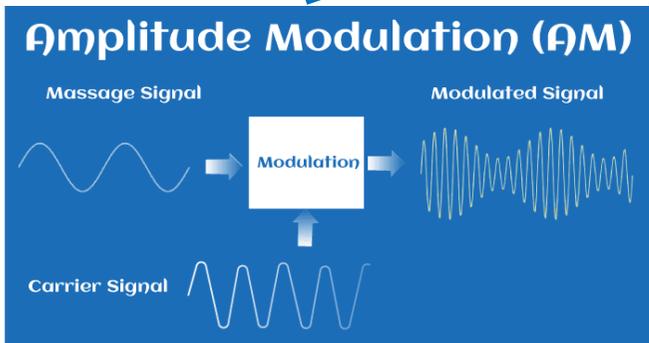
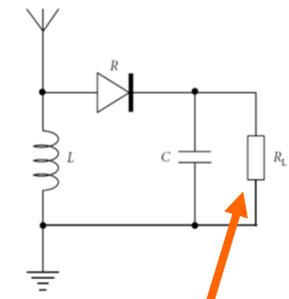
Há condução em uma direção da corrente apenas



➤ A retificação de corrente alternada e a detecção de ondas eletromagnéticas



Retificação e deteção



Sinal detectado/demodulado

➤ primeiros retificadores

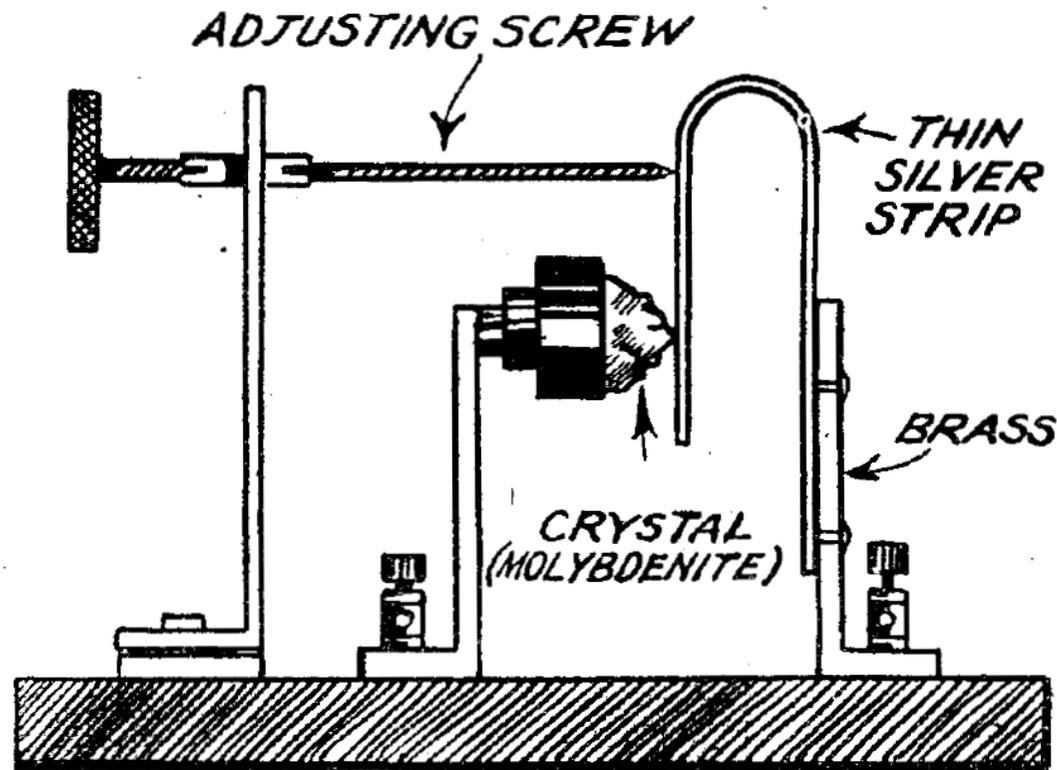


FIG. 1.

Popular Wireless, Crystal Experimenter's Handbook, outubro 1925.

- O cristal (galena, pirita, molibinedita, germânio, silício, etc.) fazia a detecção comportando-se como observado no coesor e nas válvulas: comportava-se como um material **semicondutor**

## ➤ A retificação ??????

### An Unsolved Problem.

The main characteristic of a rectifying mineral or crystal contact is its property of unilateral conductivity, a phenomenon, which, as every radio amateur knows, consists in the passing by the crystal contact of a current in one direction, but of the almost complete stoppage of it when it is made to flow in the opposite direction.

The great difficulty is, of course, to understand the reason why certain contacts of mineral and other materials should exhibit this property. Does the rectifying action take place entirely at the surface point of contact only, or does it take place in the interior of the crystal? Is it a phenomenon of heat effects at the point of contact, can it be explained on an electrolytic basis, or does it rest, after all, on some peculiar chemical or molecular structure of the crystal itself?

To be brief, these points have not been settled, and, despite many new suggestions, we seem as far off as ever from the completely satisfactory solution of the problem.

Finally, some crystal rectification theories explain the effect upon a physical basis only. We know infinitely more about crystal architecture at the present time than we did even ten years ago, and underlying all these modern theories is the idea that some peculiarity of the atomic pattern of the crystal is responsible, not only for the rectifying action of the crystal, but also for its function as a generator of oscillatory currents, and for other electrical properties which it exhibits.

### Later Theories.

Further still, there are a number of theories extant which attempt to explain the problem by assuming that the area of contact and its state of imperfectness allows the passage of minute currents much more in one direction than it does in the other. These theories are perhaps the oldest of the lot, but they have

very few good points to recommend them.

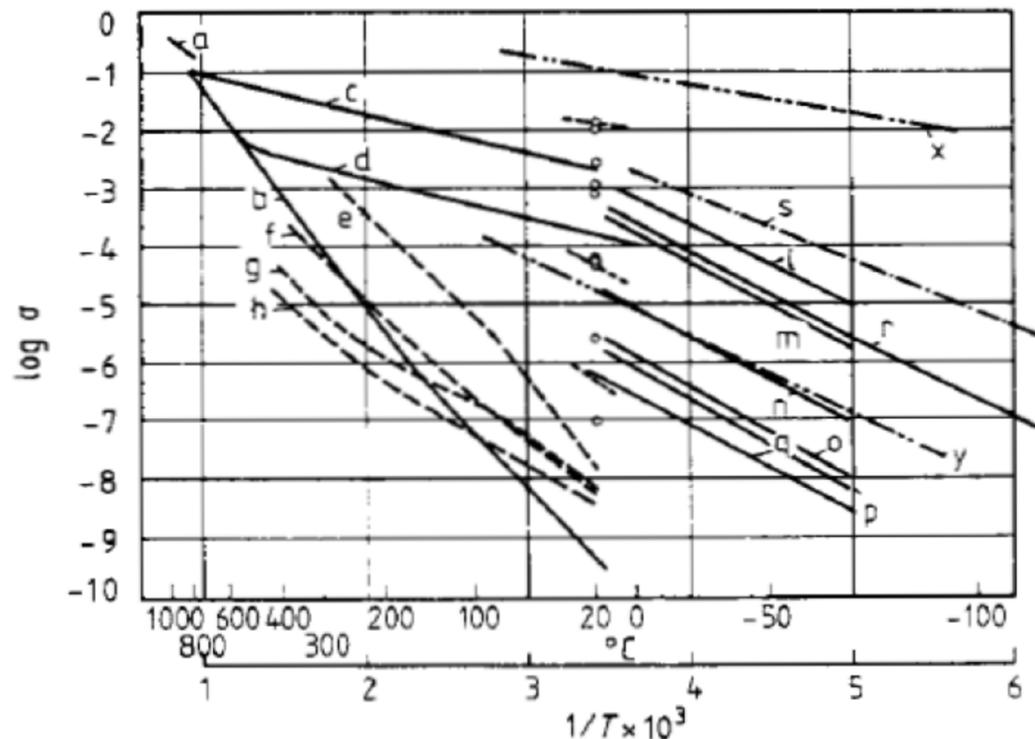
Most of the later theories of mineral rectification are of a physico-chemical or an atomic nature. It has been suggested, on the one hand, that if a perfectly pure mineral or crystal could be obtained (that is, one which does not contain the slightest trace of chemical impurity), it would probably be found to be a non-rectifier. We may call this the "chemical theory" of crystal rectification, for it is one which suggests that the rectifying action of the mineral is due to the upsetting of its regular pattern by the intrusion of small amounts of impurities, and of therefore setting up in the interior (or on the surface) of the crystal areas of varying resistance.

Popular Wireless, Crystal  
Experimenter's Handbook,  
outubro1925.

## ➤ A Segunda Guerra Mundial e a tecnologia de radares

A necessidade imposta pela guerra para o desenvolvimento de tecnologias de detecção de aeronaves levou (por vários caminhos diferentes) ao uso de Ge e Si puros para serem usados como retificadores do tipo “point-contact” (Karl-Horovitz)

Antes da guerra,



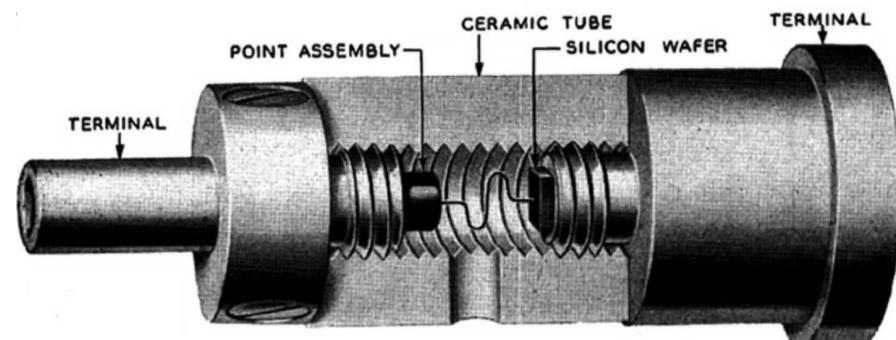
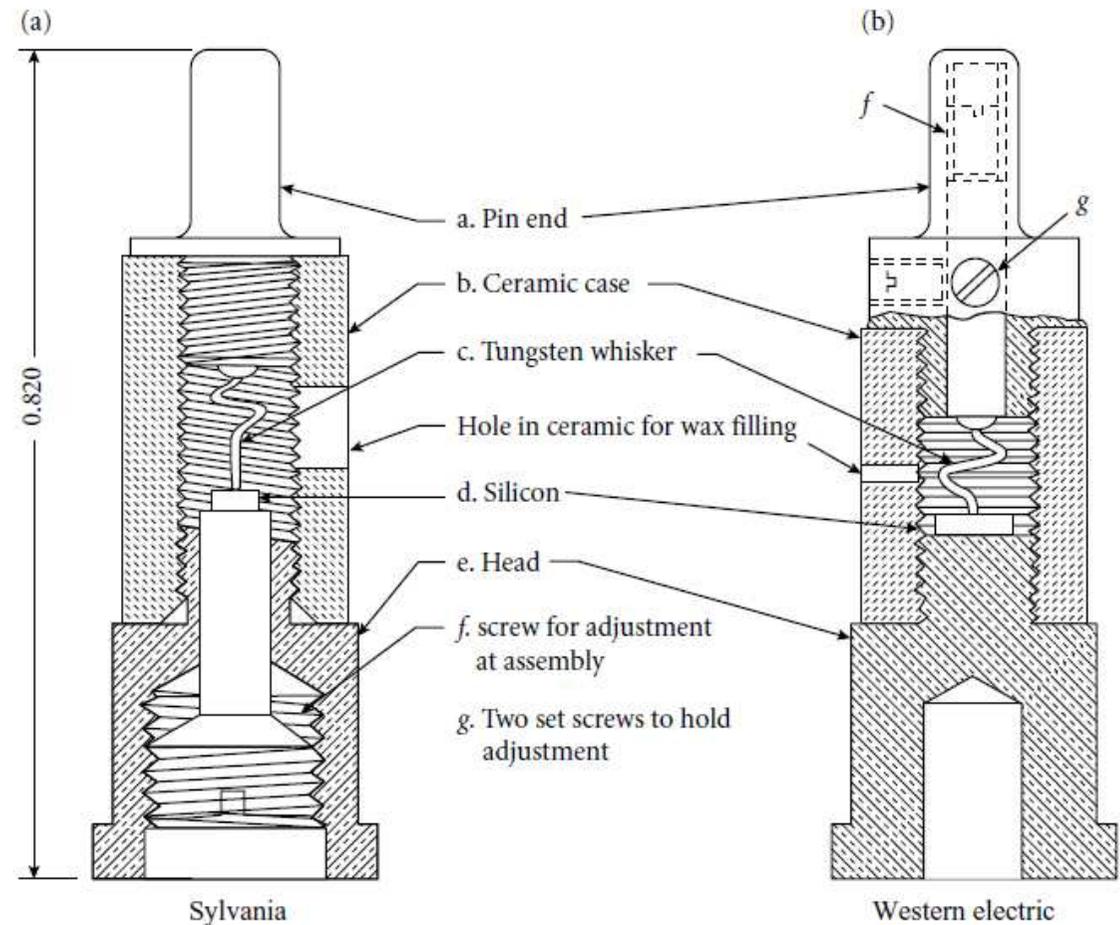
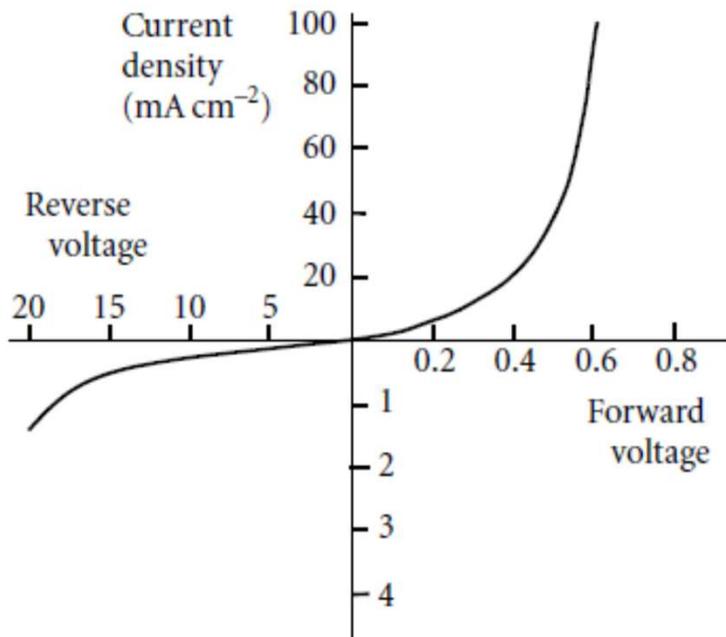
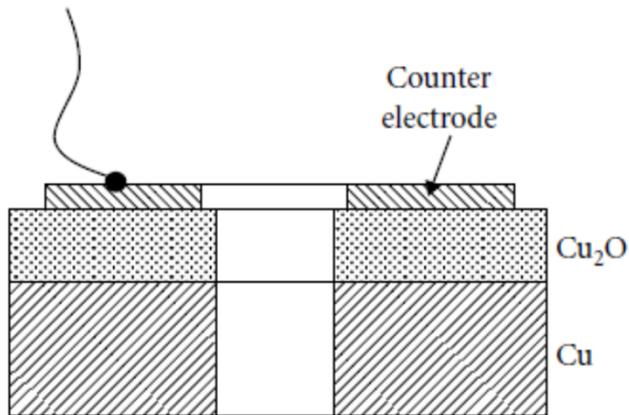
**Ge e Si: pureza da ordem de 90%**

**Depois da guerra,**

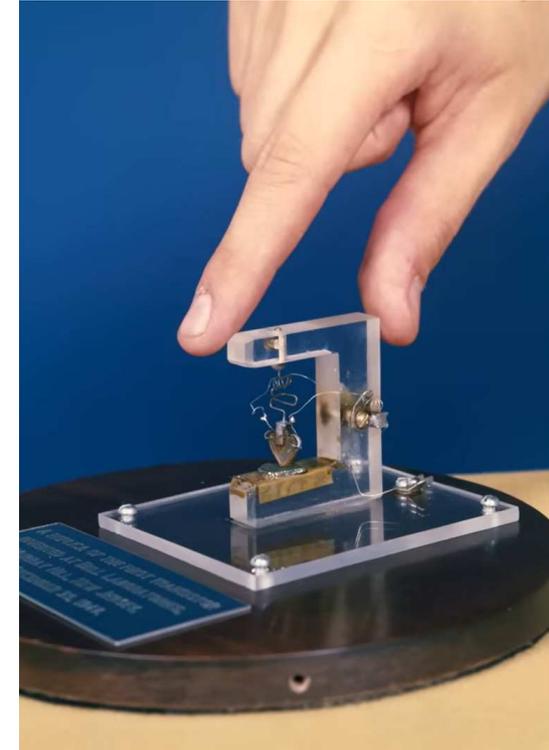
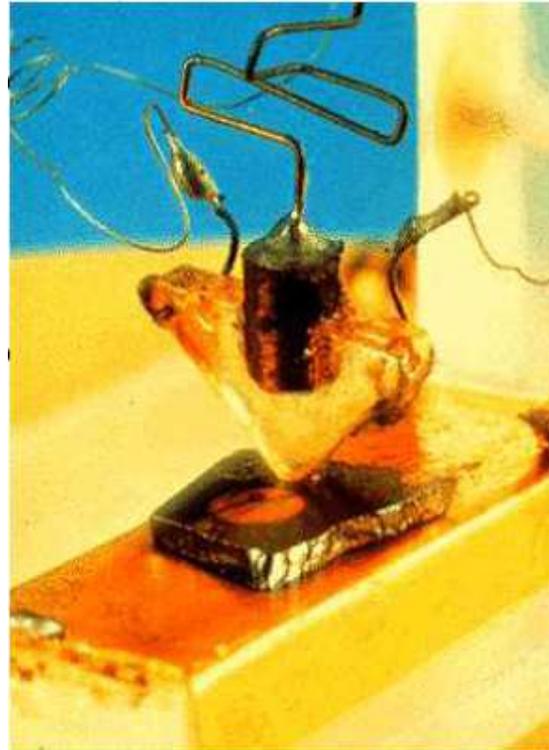
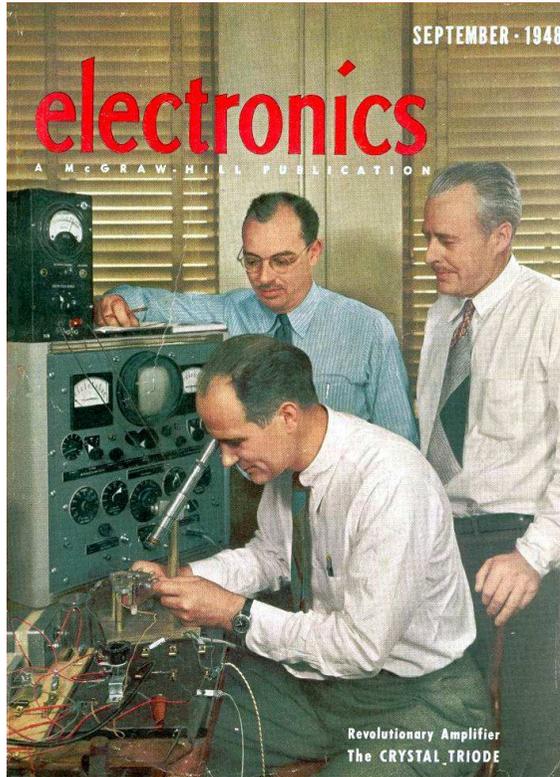
**Ge e Si: com  
pureza da ordem  
de 99,999%**

**(DuPont, 1947)**

# ➤ Os primeiros diodos comerciais de $\text{Cu}_2\text{O}$ e de silício

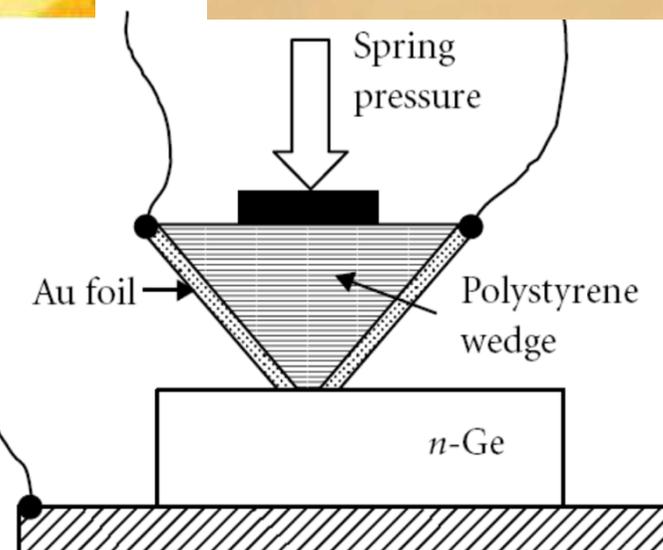


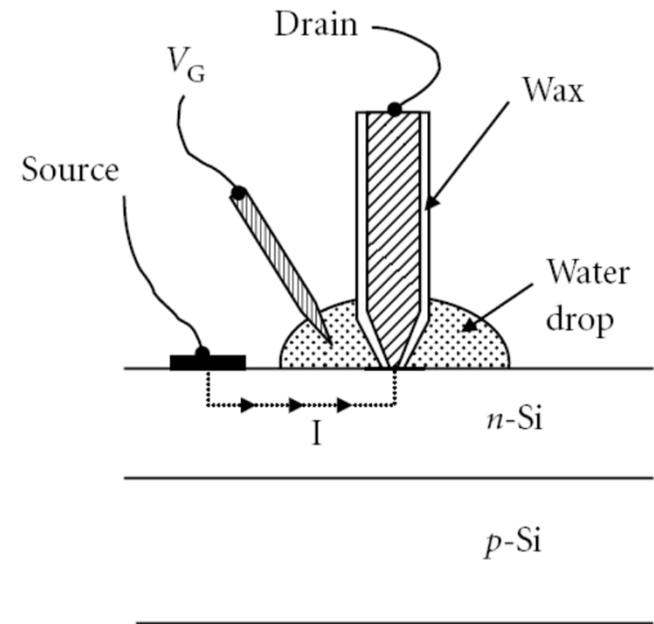
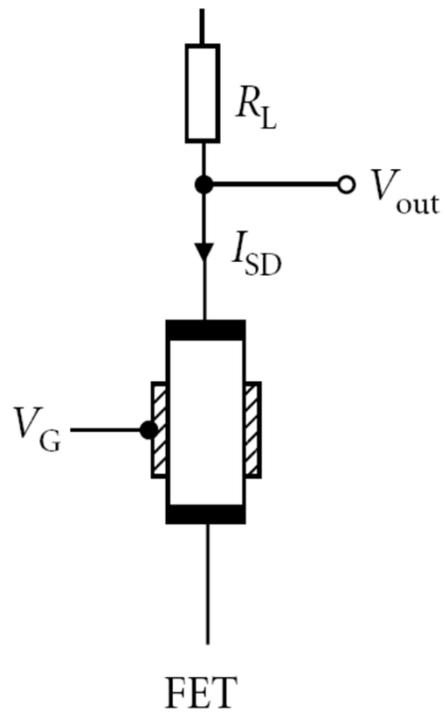
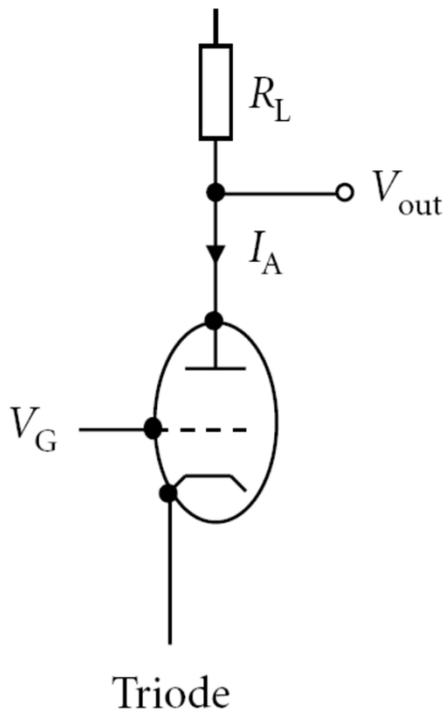
Cientistas do Bell Labs (Bardeen e Brattain e depois Shockley) estavam estudando uma **válvula de estado sólido** de germânio: **o transistor**



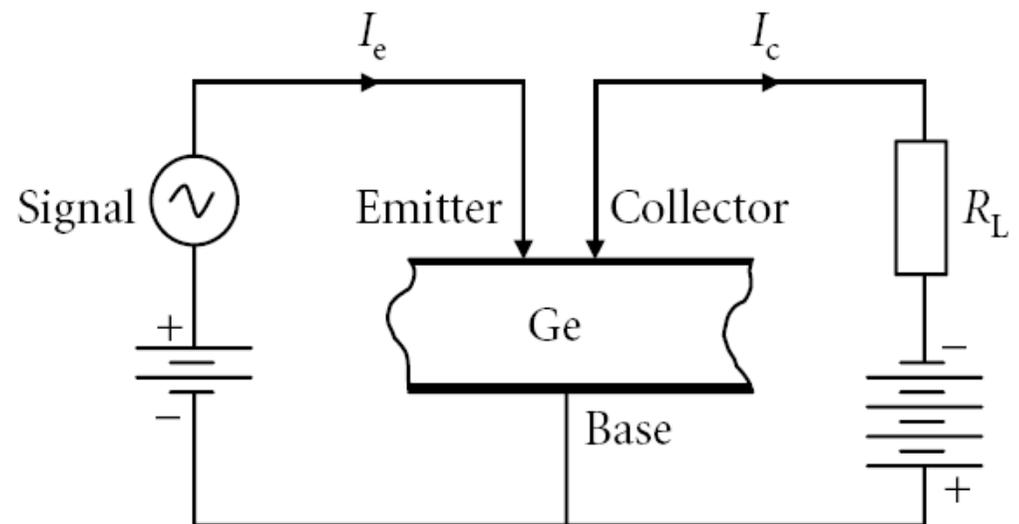
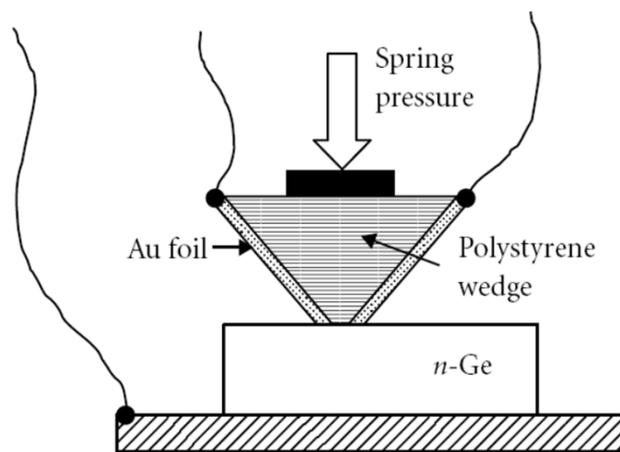
Nobel de 1956

Era da microeletrônica:  
16 de dezembro de 1947





## Visões de tecnologia !



# Primeiro transistor comercial: CK 721 (1950)

**RAYTHEON** BK-10

**TRANSISTOR APPLICATIONS**

More than 50 Practical Circuits using  
RAYTHEON CK722 TRANSISTORS.

Complete How-To-Do-It Instructions.

PRICE 50¢

**RAYTHEON** TECHNICAL INFORMATION

*Excellence in Electronics*

**GERMANIUM TRANSISTOR**

**TYPE CK 721**

The CK721 is a PNP junction transistor intended primarily for use in audio or low radio frequency applications. The tinned flexible leads may be soldered or welded directly to the terminals of circuit components without the use of sockets. Standard inline subminiature sockets may be used by cutting the leads to a suitable length.

**MECHANICAL DATA**

CASE: Plastic and Glass  
BASE: None (0,016" tinned flexible leads. Length: 1,5" min. Spacing: 0,08" center-to-center)

**TERMINAL CONNECTIONS:** (Red Dot is adjacent to Lead 1)

Lead 1 Collector  
Lead 2 Base  
Lead 3 Emitter

**MOUNTING POSITION:** Any

**ELECTRICAL DATA**

**RATINGS - ABSOLUTE MAXIMUM VALUES:**

Collector Voltage ( $V_c$ )	-15 volts
Peak Collector Voltage ( $V_{c_p}$ ) <sup>⊙</sup>	-30 volts
Collector Current	-10 ma.
Collector Dissipation *	
Emitter Current	10 ma.
Ambient Temperature ■	70 °C

**AVERAGE CHARACTERISTICS:** (at 27°C)

Collector Voltage	-6 volts
Emitter Current	1,0 ma.
Collector Resistance	2,0 meg.
Base Resistance	700 ohms
Emitter Resistance	25 ohms
Base Current Amplification Factor	45
Cut-off Current (approx.)	6 $\mu$ a.
Noise Factor (max.) <sup>⊙</sup>	22 db

**AVERAGE CHARACTERISTICS - COMMON EMITTER:** (at 27°C)

Collector Voltage	-6 volts
Emitter Current	1,0 ma.
Input Resistance	1500 ohms
Load Resistance	20,000 ohms
Power Gain (Matched Input)	41 db

**AVERAGE CHARACTERISTICS - COMMON COLLECTOR:** (at 27°C)

Collector Voltage	-6 volts
Emitter Current	1,0 ma.
Input Resistance $\Delta$	0,6 meg.
Load Resistance	20,000 ohms
Power Gain (Matched Input)	15 db

**AVERAGE CHARACTERISTICS - COMMON BASE:** (at 27°C)

Collector Voltage	-6 volts
Emitter Current	1,0 ma.
Input Resistance	70 ohms
Load Resistance	0,1 meg.
Power Gain (Matched Input)	31 db.

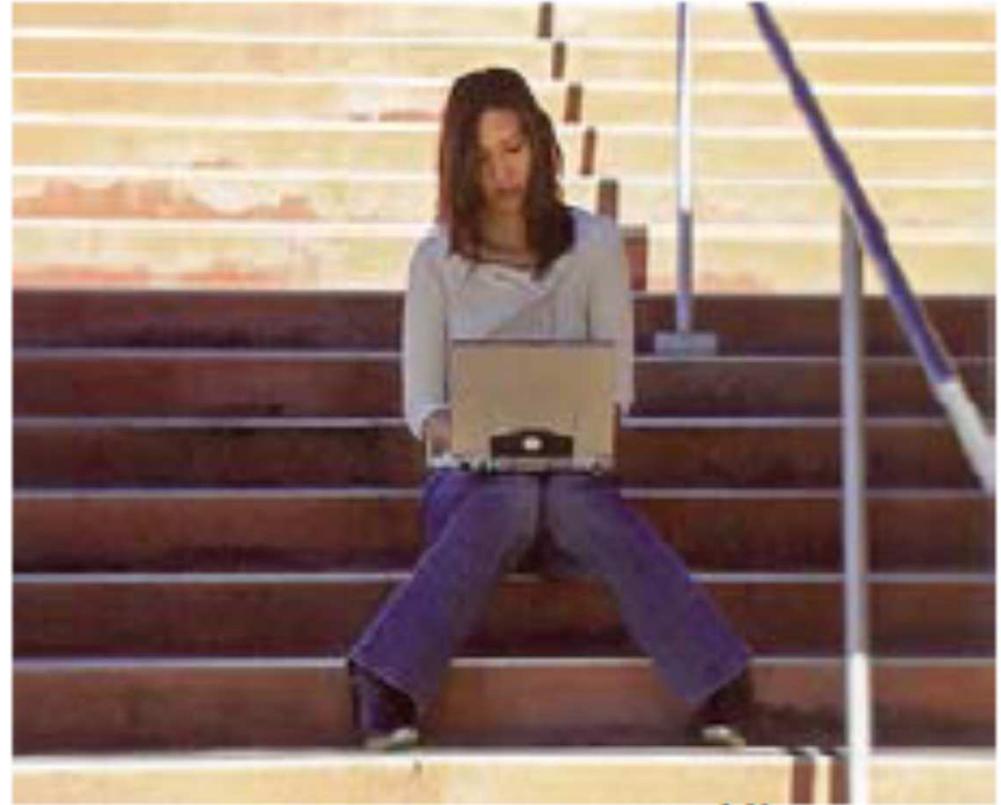
■ This is the maximum operating or storage temperature recommended.  
⊙ Measured under conditions for grounded emitter operation at  $V_{cb} = -2,5$  volts for a 1 cycle bandwidth at 1000 cycles.  
 $\Delta$  Higher input impedances, without appreciable loss in gain, can be achieved by operating at lowered collector currents.  
\* This is a function of maximum ambient temperature ( $T_A$ ) expected. It is approximately equal to  $4(70^\circ C - T_A)$  milliwatts.  
⊙ In circuits stabilized for  $I_c$  or  $I_e$  and which do not have critical distortion requirements, absolute maximum peak voltage is 60 volts.  
⊙ Collector voltage  $V_{ce}$  at which  $I_c$  rises to 2 ma. in common emitter circuit with base lead connected directly to emitter lead. Ambient temperature = 25°C.

Tentative Data

107

## Why Small?

- To pack more functionality into each unit area
  - With feature size shrinking and wafer size growing, more and better products each wafer – better economics

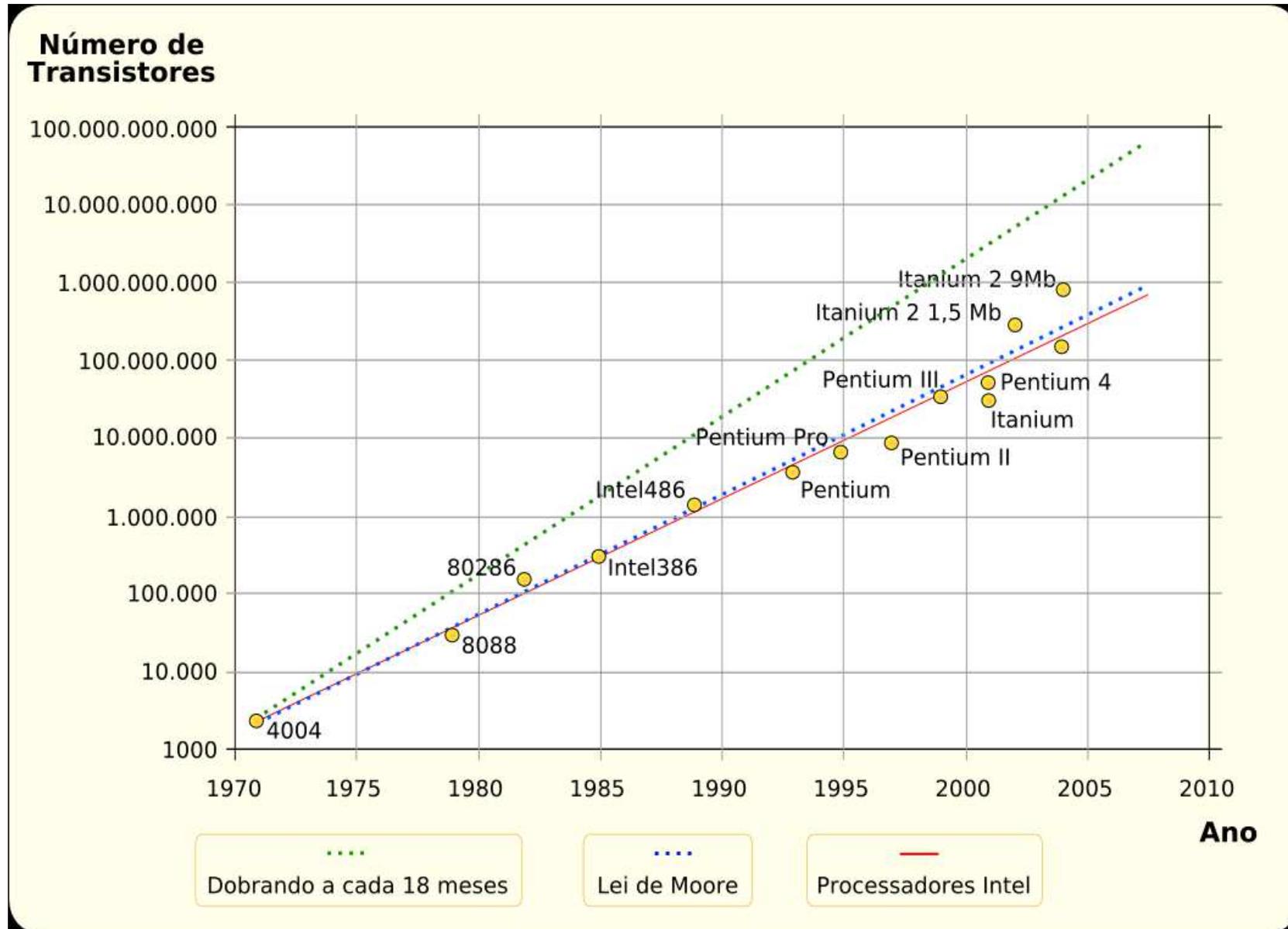


2006: 1 “microdolar”/transistor

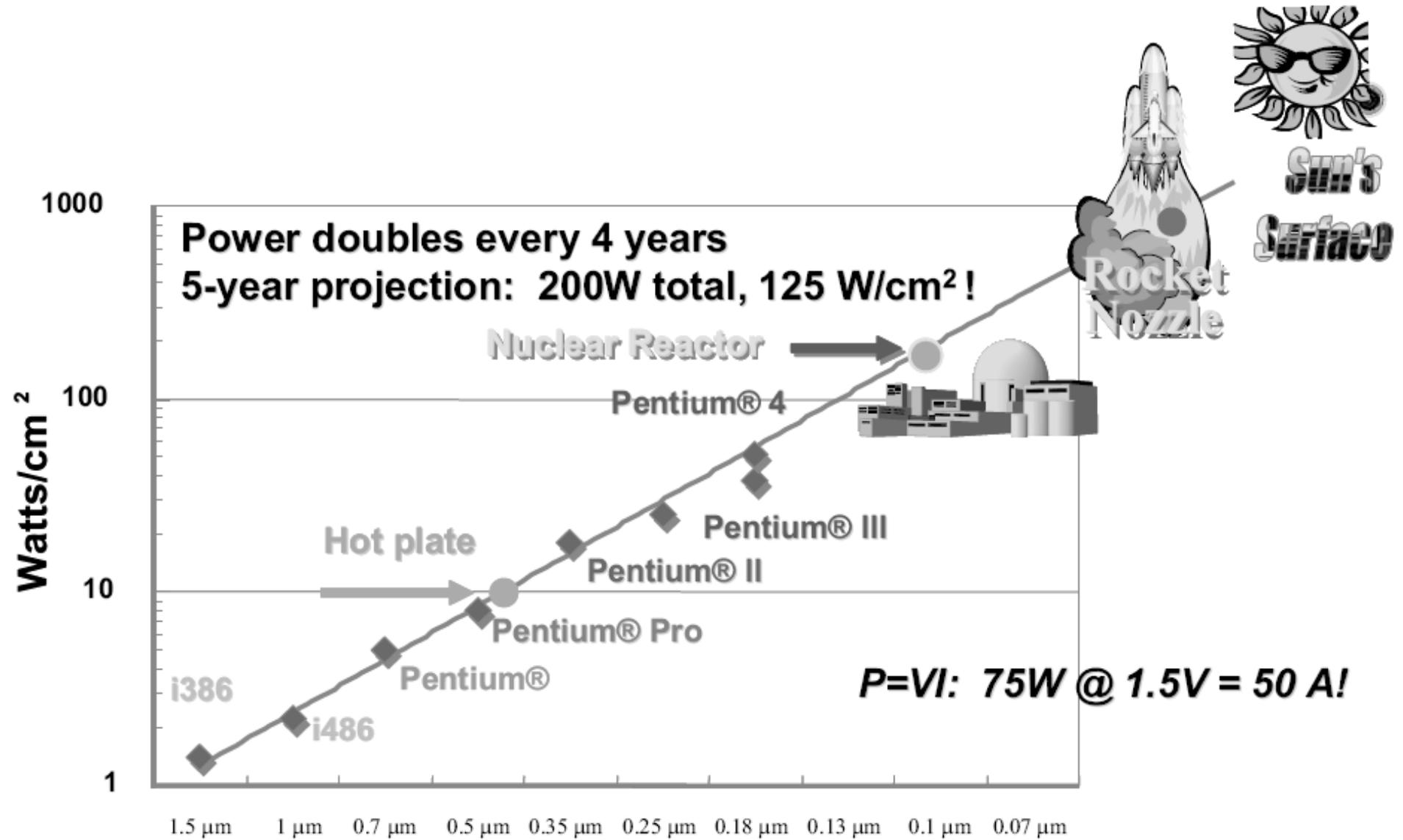
Transistor radio!

1965: \$1 /transistor

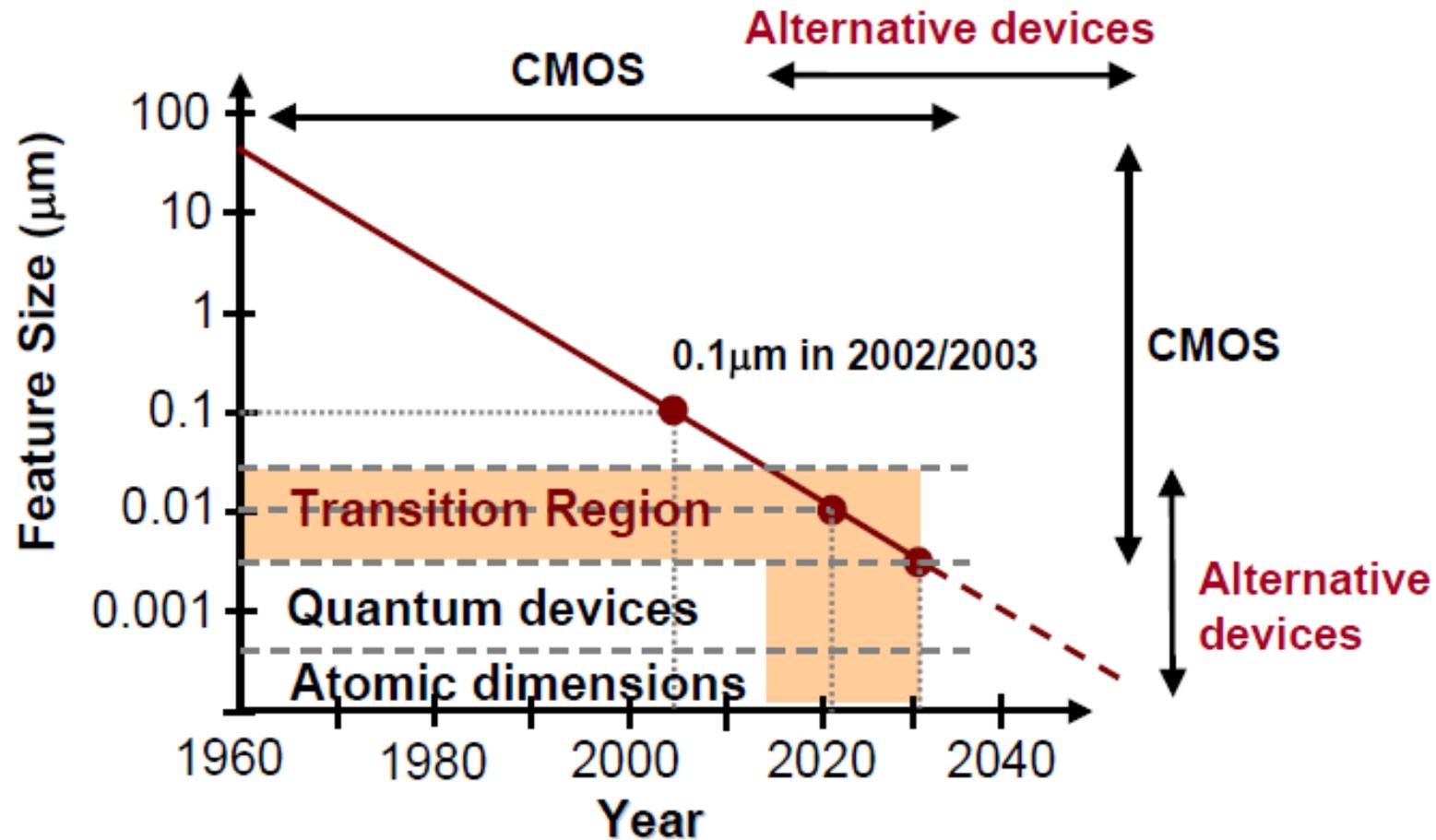
- Uma revolução foi iniciada e mantém até hoje a sociedade como a conhecemos.



# Mais impressionante ?



# Nano-reality: CMOS IC evolution



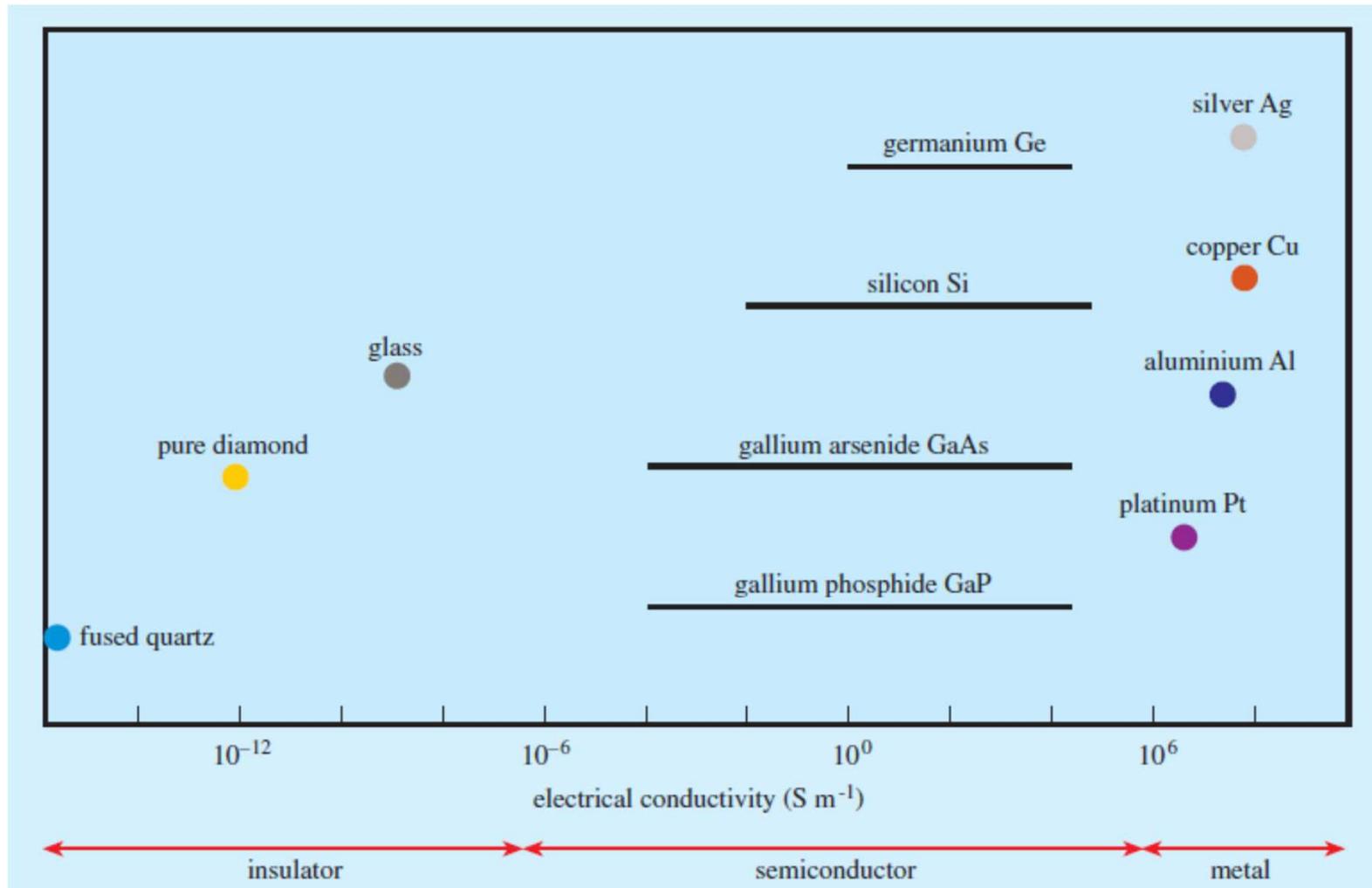
*Adapted from J.D. Plummer, Proceedings of IEEE, 2001.*

## ➤ Bibliografia

- Bleaney, B., Ryde, J. W., and Kinman, T. H. (1946) 'Crystal valves', *J. Inst. Elect. Engrs. IIIA*, 93, 847–854.
- Garratt, G. R. M. (1994) *The Early History of Radio*, Institute of Electrical Engineers, London.
- Henisch, H. K. (1957) *Rectifying Semi-Conductor Contacts*, Oxford University Press, Oxford.
- Lark-Horovitz, K. (1954) 'The new electronics', in *The Present State of Physics* (ed. F. S. Brackett) American Association for the Advancement of Science, pp. 57–127.
- Levinshtein, M. E. and Simin, G. S. (1992) *Getting to Know Semiconductors*, World Scientific Publishing Co Pte Ltd, Singapore.
- Lomas, R. (1999) *The Man Who Invented the Twentieth Century*, Headline Book Publishing, London, ch. 9.
- Pearson, G. L. and Brattain, W. H. (1955) 'History of semiconductor research', *Proc. IRE*, 43, 1794–1806.
- Richtmyer, F. K. and Kennard, E. H. (1950) *Introduction to Modern Physics* McGraw-Hill, New York.
- Seitz, F. and Einspruch, N. G. (1998) *Electronic Genie—The Tangled History of Silicon*, University of Illinois Press, Urbana.
- Smith, R. A. (1959) *Semiconductors*, Cambridge University Press.
- Torrey, H. C. and Whitmer, C. A. (1948) 'Crystal rectifiers', in *MIT Radiation Laboratory Series* (eds. S. A. Goudsmit, J. L. Lawson, L. B. Linford, and A. M. Stone) McGraw-Hill, New York.

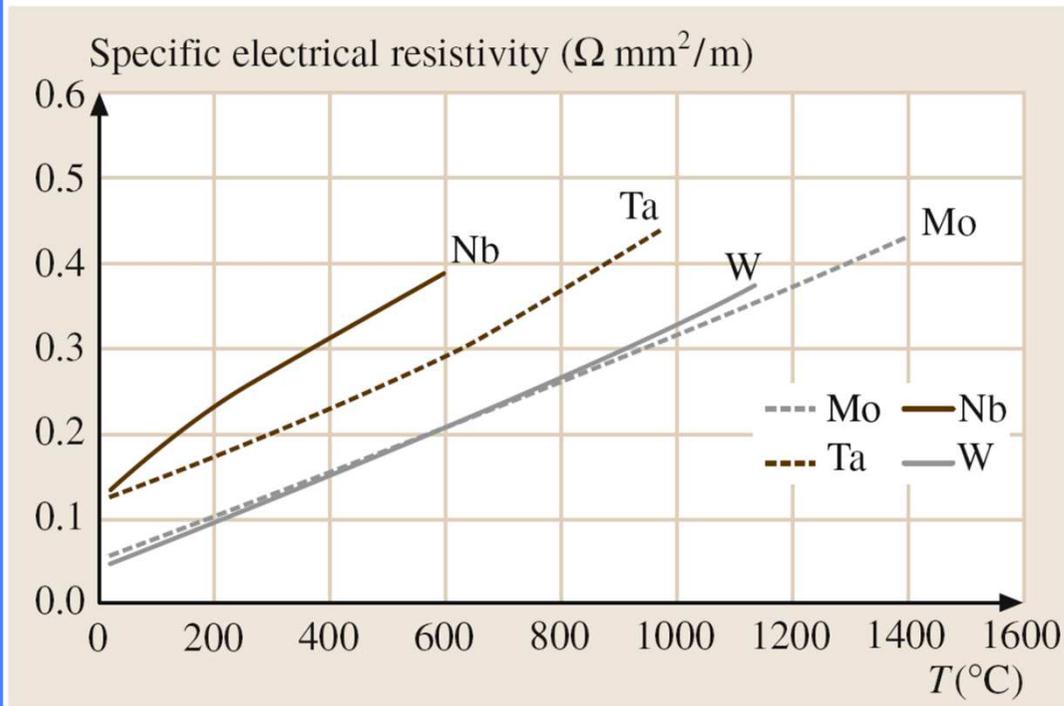
# **Materiais semicondutores**

# Material Semicondutor



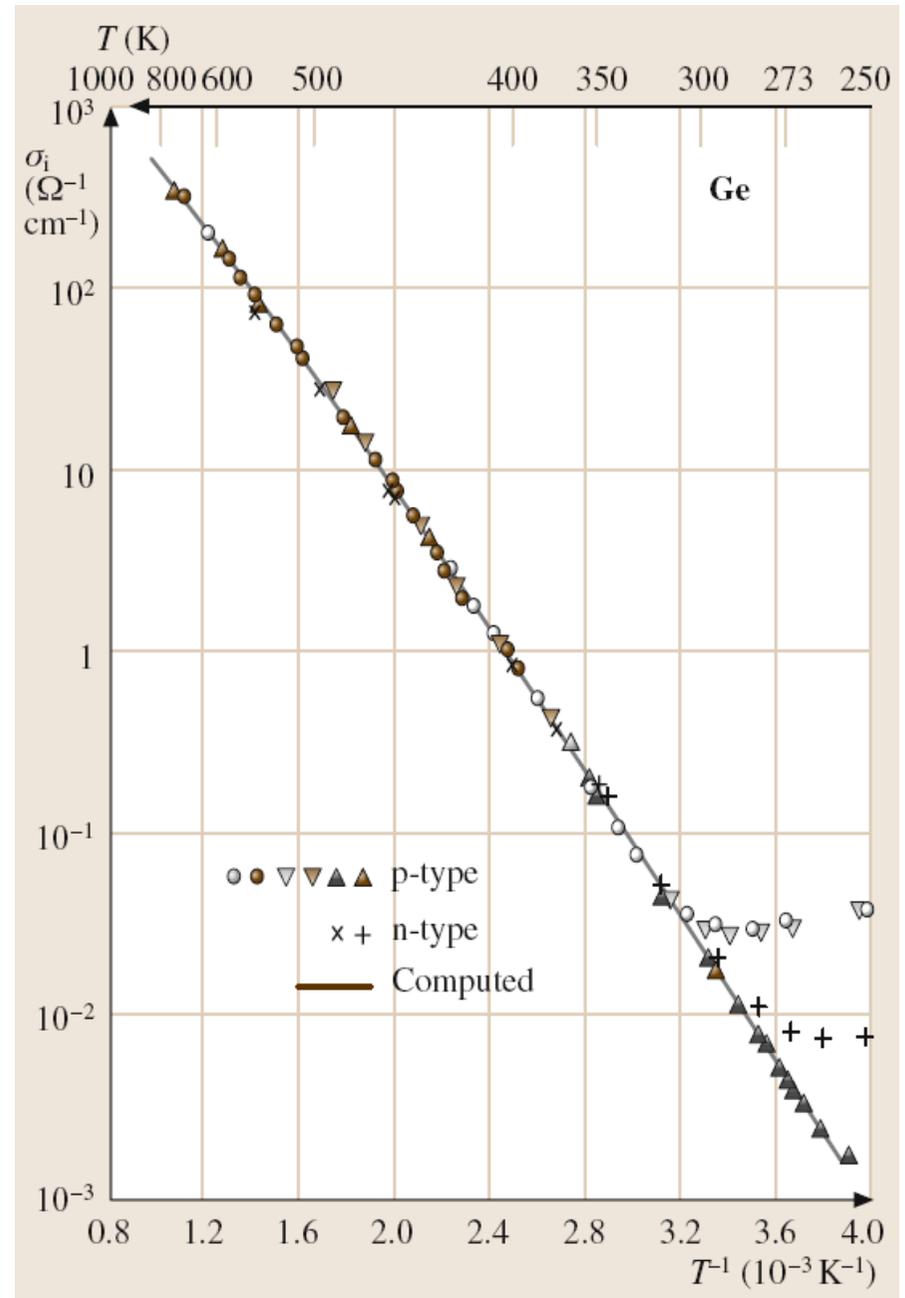
O que significa um material semicondutor ou de forma mais geral: o que é a **propriedade semicondutora** e porque se tornou importante do ponto de vista tecnológico?

# Diferenças?

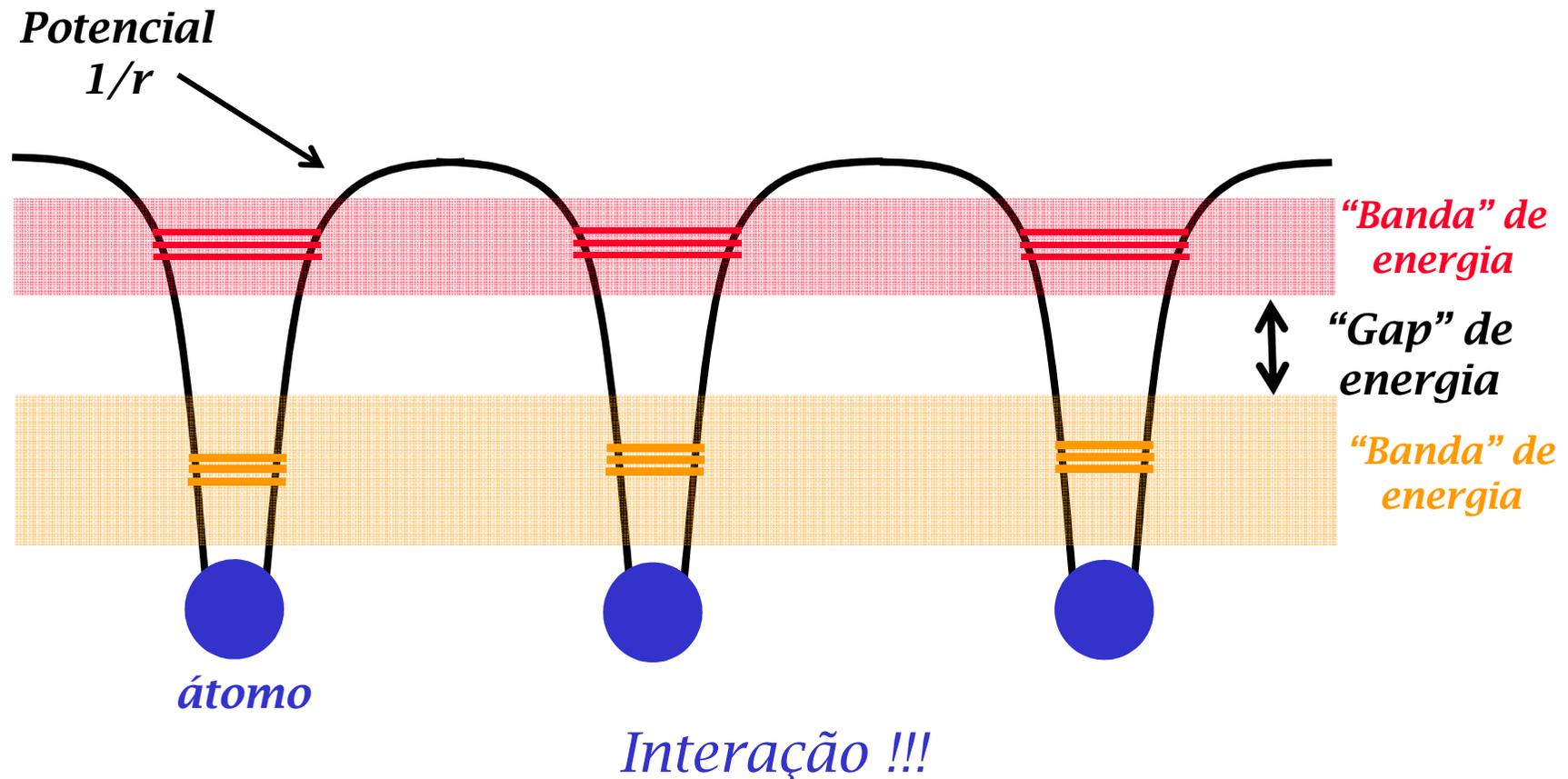


Metais

# Semicondutor (Ge)

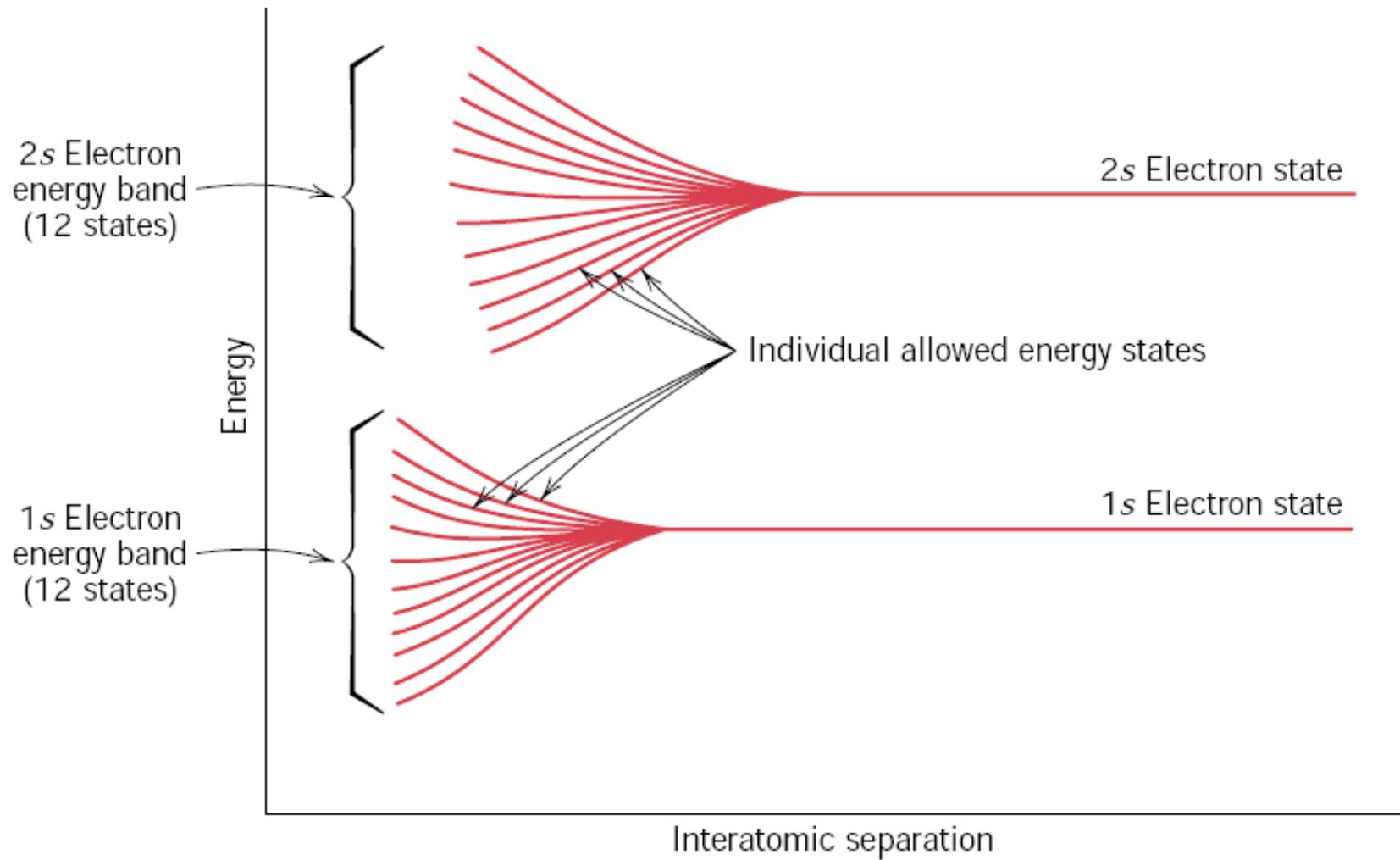


**Cristal** (metal/semicondutor/isolante) = átomos dispostos periodicamente em uma dada configuração espacial

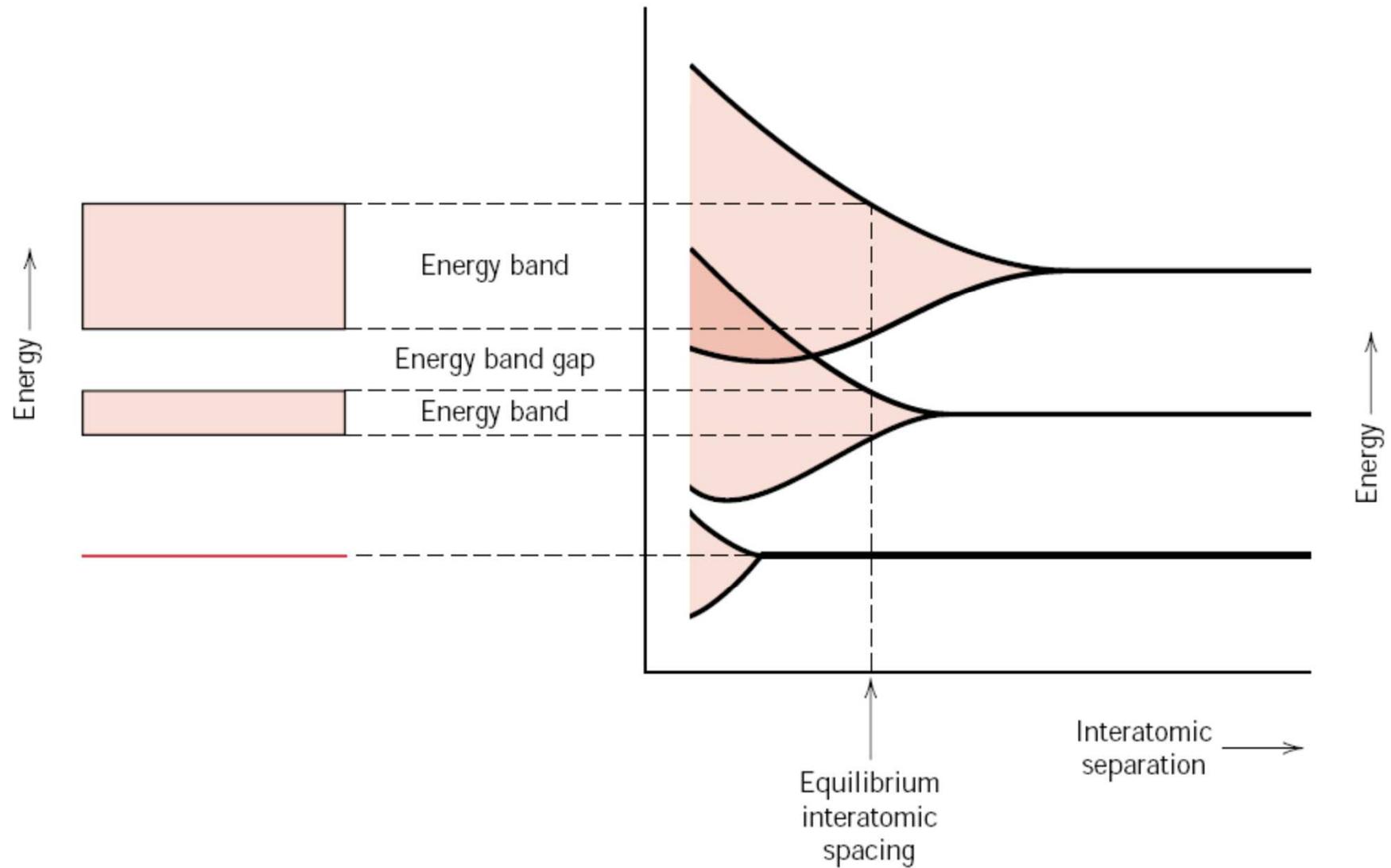


*Semicondutor = material que apresenta uma condutividade intermediária entre um metal e um isolante.*

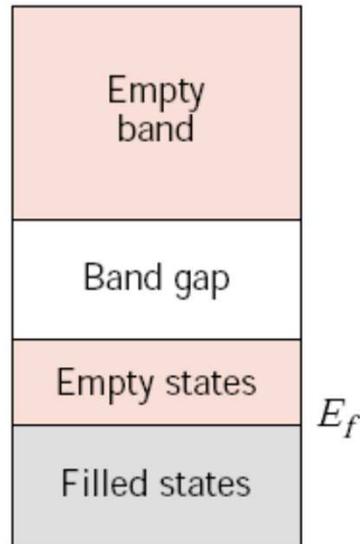
# Átomos ...



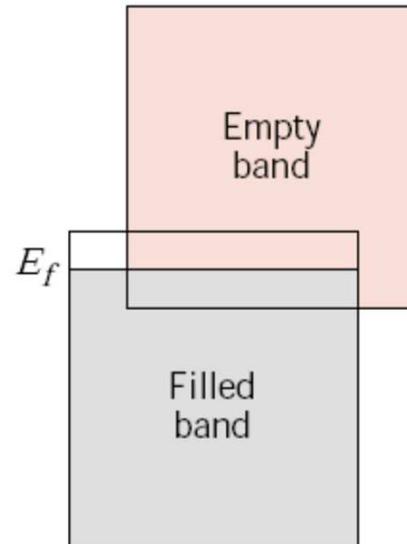
# Cristal (semicondutor, por exemplo) ...



## Algumas particularidades ...



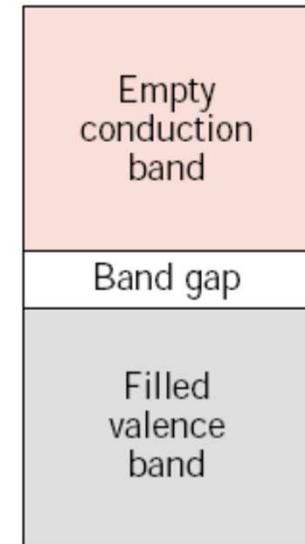
Metal  
(cobre)



Metal  
(magnésio)



Isolante

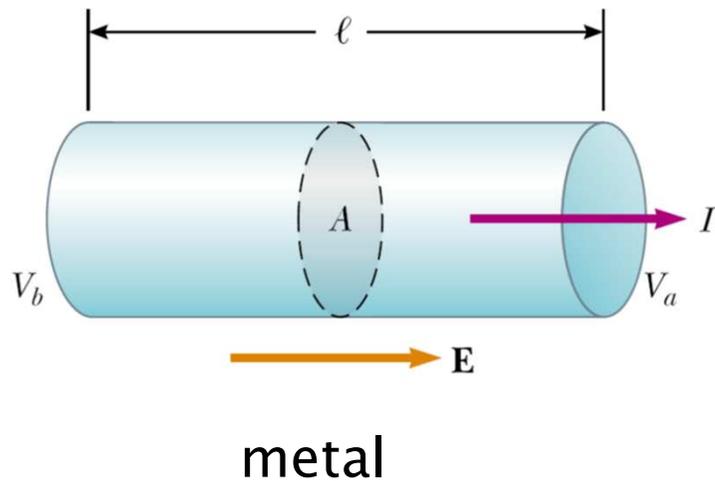


Semicondutor

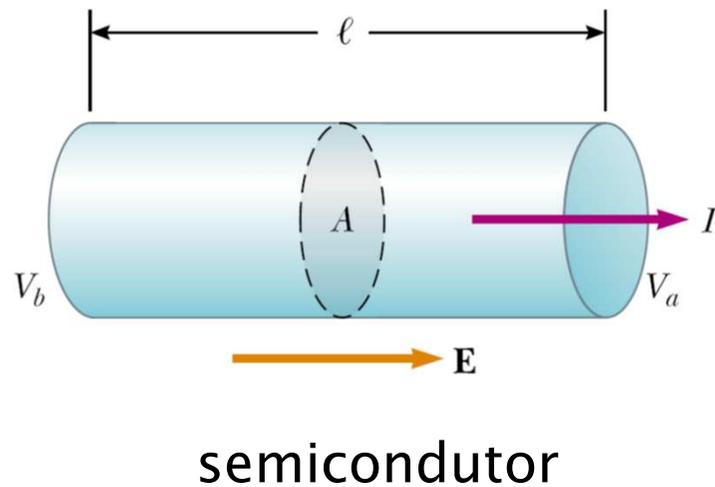
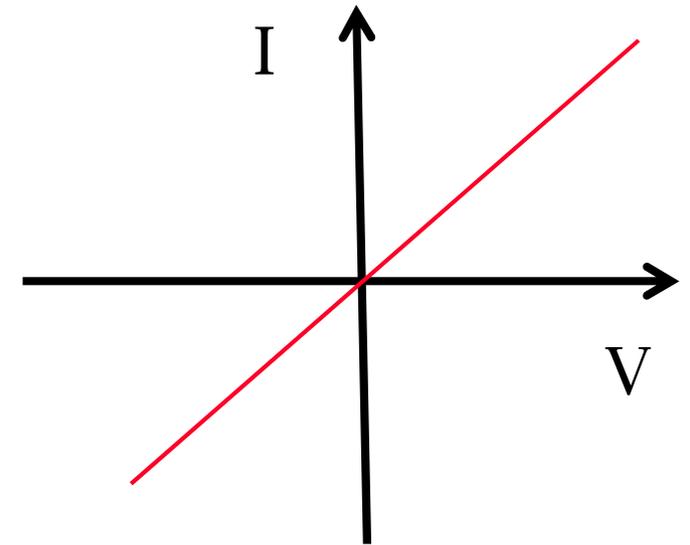
$$H = T_e + T_I + V_{ee} + V_{II} + V_{eI} =$$

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \sum_{i=1}^{3n} \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} + \sum_{i=1}^{3N} \frac{-\hbar^2}{2M_j} \frac{\partial^2}{\partial X_j^2} + V_{ee}(x) + V_{II}(X) + V_{eI}(x, X)$$

# A "grande propriedade": a retificação de corrente alternada



*Lei de Ohm*



?

