TE346
Engenharia Elétrica e Sociedade

Prof. Ewaldo Luiz M. Mehl

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DELT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Do transístor ao microprocessador

[1.ª Parte]

1

Eletrônica

eletrônica

[Var. de *electrônica*, fem. substantivado do adj. *electrônico*.]

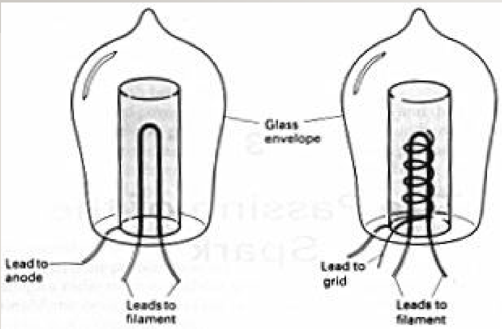
S. f.

Parte da engenharia dedicada ao estudo do comportamento de circuitos elétricos que contenham válvulas, semicondutores, transdutores, etc., ou à fabricação de tais circuitos.

2

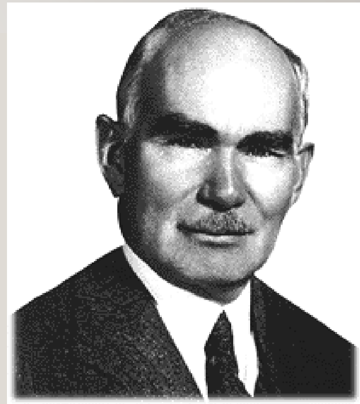
Origens...

1906
Lee De Forest: A Válvula Eletrônica / *Audion*



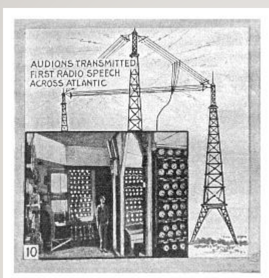
Desenho de uma revista de eletricidade de 1920 mostrando a evolução da válvula diodo para válvula triodo

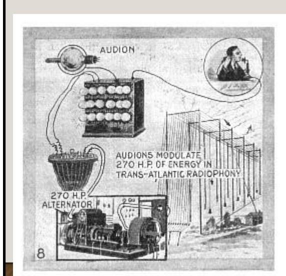
Válvula triodo construída por De Forest para testar sua idéia

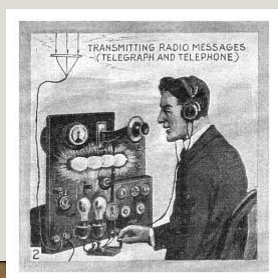


3

Origens...



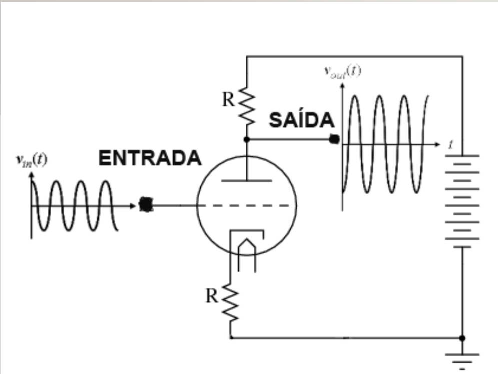


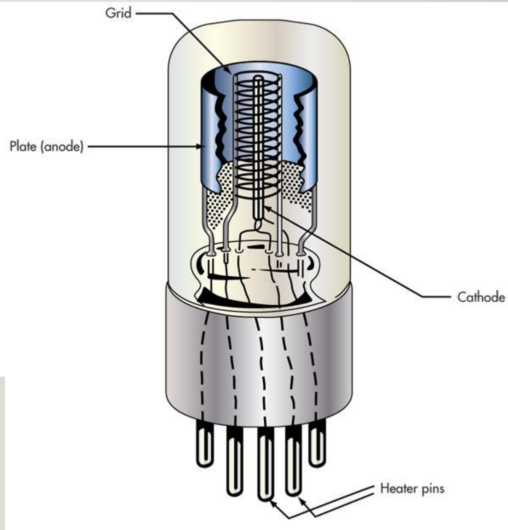


Audion de De Forest, 1906

4

Válvulas eletrônicas





5

6

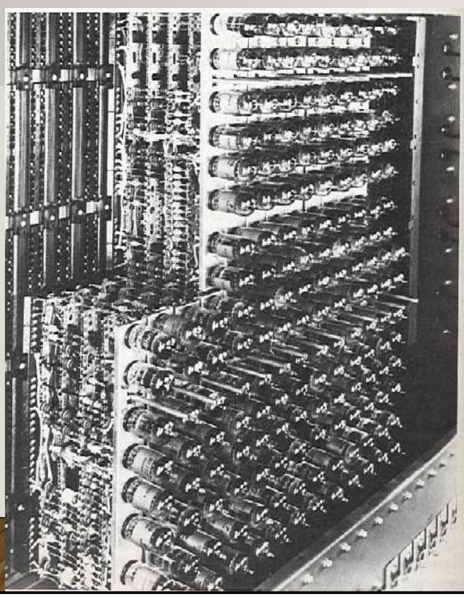
Apesar de serem consideradas geralmente *obsoletas*, ainda existem empresas fabricantes de válvulas eletrônicas, que são usadas em equipamentos de áudio de preço elevado e principalmente em amplificadores para guitarras e baixos elétricos.

https://spectrum.ieee.org/the-cool-sound-of-tubes

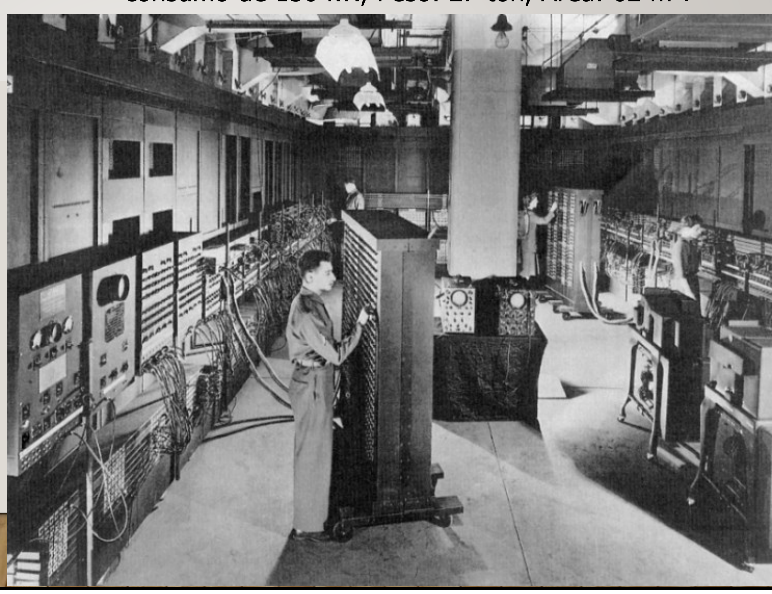
7

Origens...

Memória de válvulas de um computador IBM, 1950. Cerca de 1,5 k*bits*.

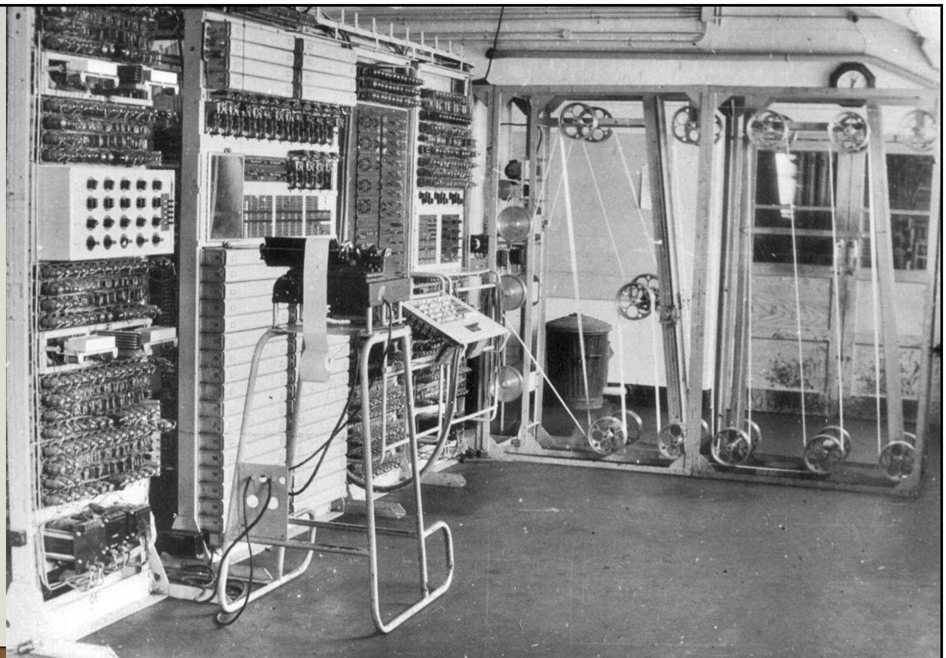


Computador ENIAC (1943-1945), com 17.468 válvulas e consumo de 150 kW, Peso: 27 ton, Área: 62 m².



8

Computador COLOSSUS (1943-1944), com 1600 válvulas (protótipo, chamado de modelo Mark I) e 2400 válvulas (modelo Mark 2).
Destinava-se a decifrar o código gerado pelas máquinas de criptografia *Lorenz*, usadas pelo alto comando nazista da Alemanha na II Guerra Mundial.



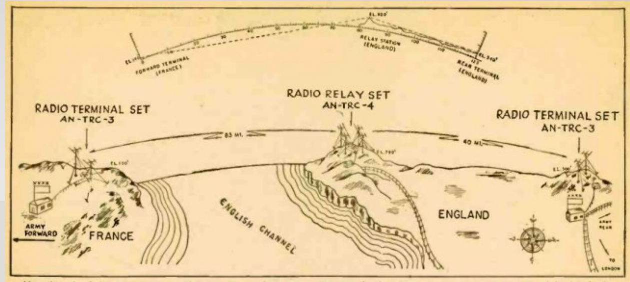
9

Até o final da II Guerra Mundial 10 unidades do Computador COLOSSUS modelo Mark 2 foram construídos e usados em *Bletchley Park* pela equipe liderada por Allan Turing. Uma 11.ª unidade foi parcialmente montada.

Após a Guerra, foi ordenado que todos os computadores Colossus fossem destruídos, exceto dois que foram levados para uso pelo *Government Communications Headquarters* britânico e supostamente desmontados na década de 1960. Também há suposições que uma destas unidades foi levada aos EUA para uso pela *National Security Agency* (NSA).

Em 2008 foi colocado em operação uma réplica do modelo Mark II em Bletchley Park, atualmente sede do *National Museum of Computing*.

10




Diario de Noticias

A INVASÃO DA EUROPA


INVASÃO!

Protegidas por grandes forças aereas e navais, tropas anglo-americanas iniciaram na madrugada o assalto em larga escala á Fortaleza da Europa

O GLOBO

EDIÇÃO EXTRA

11

Eletrônica na II Guerra Mundial

- Crescente demanda por equipamento eletrônico militar → Grande investimento militar no desenvolvimento da eletrônica
- Ficou demostrada a importância estratégica das telecomunicações e do radar → Grande investimento militar no desenvolvimento das telecomunicações
- Cristais de germânio usados como detectores de radar deram uma vantagem estratégica aos aliados → Grande investimento militar nas pesquisas sobre semicondutores
- Equipamentos portáteis de rádio-comunicação foram essenciais para a vitória aliada → Necessidade de diminuir o tamanho dos equipamentos
- Desenvolvimento dos primeiros computadores (cálculos balísticos & criptografia) → Necessidade desse ter alguma coisa mais confiável que as válvulas

12

MATERIAIS SEMICONDUTORES

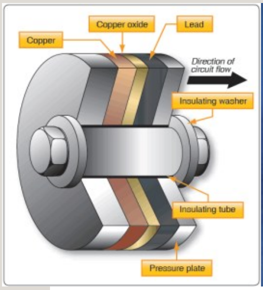
Ao contrário de que muitos acreditam, matérias semicondutores eram conhecidos e estudados muito antes da invenção dos transístores e foram usados para construir alguns equipamentos

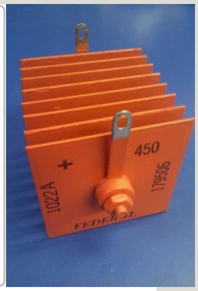
1876: Adams & Day descobrem o efeito fotovoltaico no selênio.

1883: Charles Fritts constrói a primeira fotocélula de selênio (eficiência < 1%). Lançamento de diversos tipos de fotômetros para fotografia.

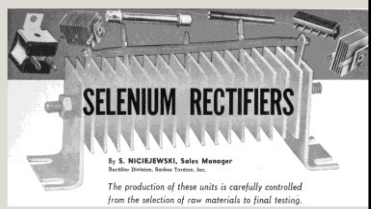
1925: E. Presser patenteou o retificador a óxido de selênio

1926: O. Grondahl patenteou o retificador a óxido de cobre





Retificador com óxido de cobre



13

MATERIAIS SEMICONDUTORES

George Clarke Southworth (1890-1972)
Bell Labs
Cristais de galena (PbS) em radares

Russel Shoemaker Ohl (1898-1987)
Penn State University
Bell Labs
Junção PN, Diodos de Ge, Célula Solar

Karl Lark-Horovitz (1892-1958)
Purdue University
Propriedades elétricas dos cristais de Germânio

14

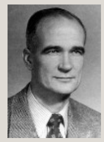
BELL LABS

1941: A **AT&T** (ex **Bell Telephone Co.**) inaugura as novas instalações do Bell Labs, em Murray Hill, New Jersey, EUA.

1945: Com a Segunda Guerra Mundial próxima ao seu fim, a Diretoria do Bell Labs estabelece o ***Solid State Physics Group***. O físico **William Shockley** é nomeado Chefe deste grupo de pesquisa.

Shockley convida o físico **Walter Houser Brattain**, que já trabalhava no Bell Labs, para integrar o grupo. Brattain era conhecido por sua habilidade em montar experimentos inéditos.

John Bardeen foi admitido no Bell Labs em outubro de 1945 e passa a integrar também o grupo de Shockley. Bardeen era graduado em Engenharia Elétrica e PhD em Física, e tinha trabalhado em um laboratório de pesquisas da Marinha dos EUA durante a Guerra. A admissão de John Bardeen no Bell Labs foi resultado de uma indicação pessoal de Walter Brattain (John Bardeen era amigo do seu irmão Robert Brattain, que sempre elogiava a inteligência prodigiosa do amigo ao irmão).



William Schokley

Walter Brattain

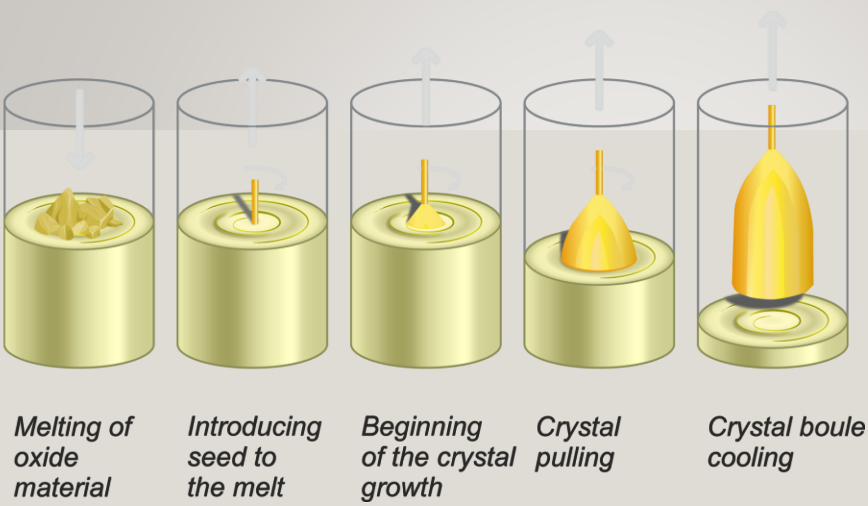
John Bardeen

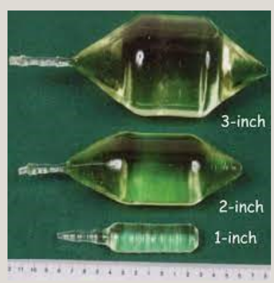
Gordon Teal, que trabalhava no Bell Labs desde 1930, também passou a fazer parte do grupo de Shockley. Em sua Tese de Doutorado, Gordon Teal havia conseguido produzir cristais de germânio de alta pureza usando o processo de Czochralski.

Gordon Teal

15

PROCESSO DE CZOCHRALSKI





Jan Czochralski (1918) "Ein neues Verfahren zur Messung der Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle" [A new method for the measurement of the crystallization rate of metals], Zeitschrift für Physikalische Chemie, 92 : 219–221.

16

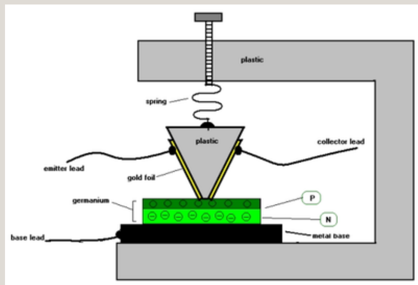
A INVENÇÃO DO TRANSÍSTOR

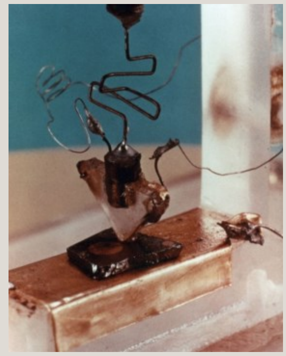
Logo no início das atividades do *Solid State Group*, William Shockley lança a ideia de um dispositivo amplificador baseado no efeito do campo elétrico em uma barra de material semicondutor. No entanto as tentativas de construção de um dispositivo físico baseado neste princípio falham (este é o princípio de funcionamento do transistor de 'efeito de campo' que se tornou realidade anos depois).

1947 John Bardeen acha que o dispositivo vislumbrado por Shockley não funcionava devido a "cargas superficiais" na interface entre o semicondutor e o eletrodo de metal. Shockley não concorda com esta explicação, mas Bardeen mesmo assim publica um artigo com a sua teoria.

1947 John Bardeen & Walter Brattain, desejando demonstrar praticamente a influência das "cargas superficiais", constroem um dispositivo amplificador baseado em um cristal de de germânio.

No dia 23 de dezembro de 1947 Bardeen & Brattain apresentam formalmente o dispositivo (ainda sem nome) aos membros do *Solid State Group*.





17

1948: **John Bardeen & Walter Brattain** publicam um trabalho descrevendo o dispositivo que construíram, usando pela primeira vez a palavra 'transistor' (o nome foi uma sugestão de um funcionário do Bell Labs)

1948: John Shive constrói um transistor de germânio com o coletor e o emissor em lados
opostos de uma fina lâmina de germânio provando que o 'efeito transistor' se dava no interior do semicondutor e não na superfície como imaginavam Bardeen & Brattain.

Tentativas de fabricar transístores com Silício em vez de Germânio mostram-se sem resultados. Motivo: **O Silício disponível na ocasião não tinha o grau de pureza necessário para a fabricação de transístores.**

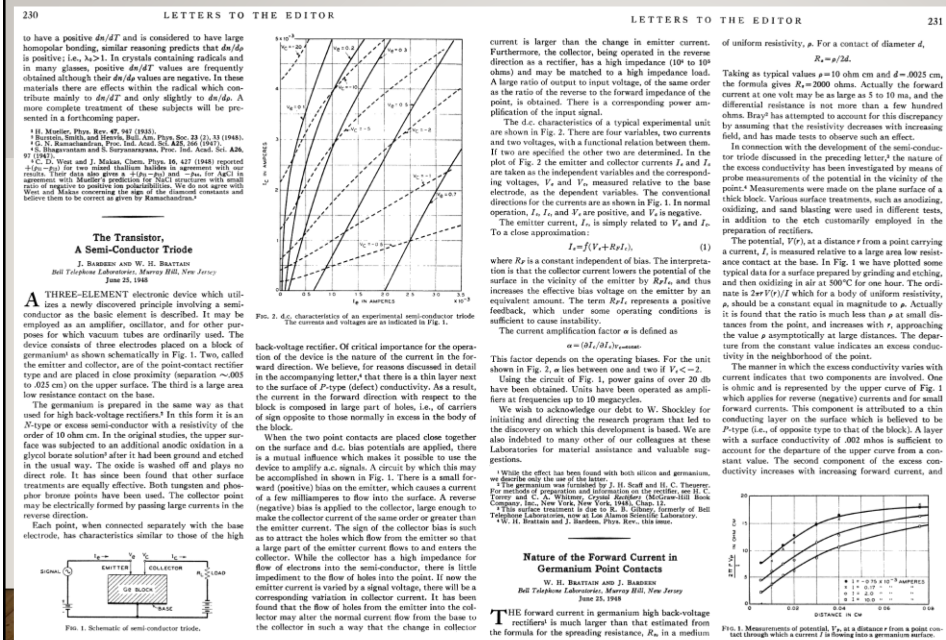
Em janeiro de 1948 Shockley preenche um formulário de patente do transístor constando apenas com o seu nome como inventor. Bardeen e Brattain ao saber da manobra de Shockley protestam violentamente. Os advogados do *Bell Labs* acabam registrando duas patentes, uma com os nomes de **Bardeen e Brattain** como "**inventores do transístor de germânio**" e outra apenas com o nome de **Shockley** como "**inventor do transístor de junção**".

1956: Bardeen, Brattain & Shockley são agraciados com o **Prêmio Nobel de Física**. Nesta época, apenas Brattain ainda trabalhava no Bell Labs, mas em um setor diferente do *Solid State Group.*

Na capa da revista *Electronics* de setembro de 1948 foi publicada uma fotografia feita no Bell Labs por ocasião do anúncio público da invenção do transístor. Shockley é o que observa o protótipo do transístor de germânio de 1947 com um microscópio. Bardeen está com os braço sobre um instrumento e Brattain, o mais velho dos três, observa atrás de Shockley.

18

O Transístor

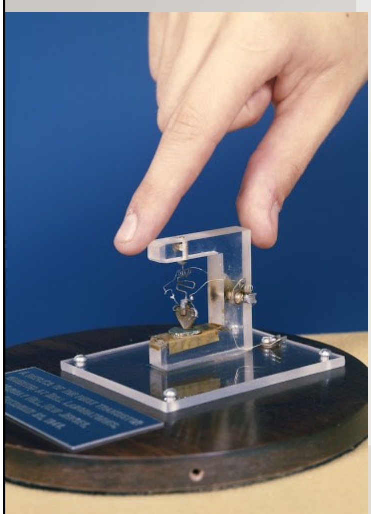


O primeiro artigo técnico onde a palavra transistor foi mencionada tem como autores BARDEEN & BRATTAIN (não contém o nome de Shockley...)

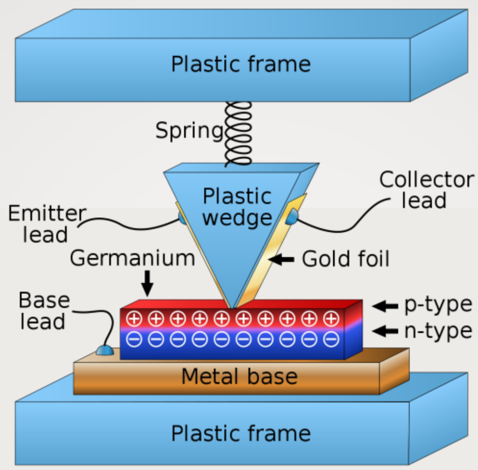
Phys. Rev. 74, p230-p231 – Published 15 July 1948

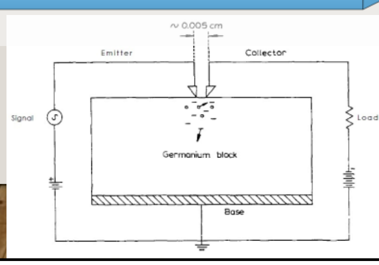
19

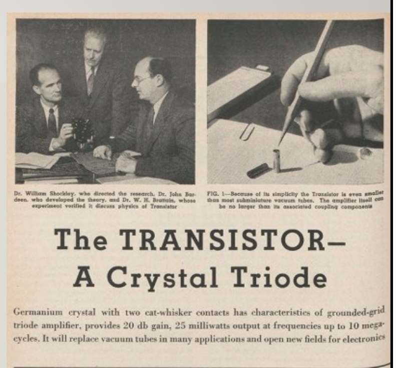
O Transístor



O primeiro transistor
Bell Labs, dezembro de 1947



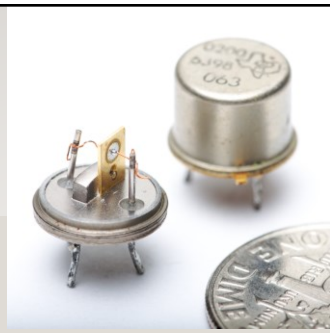


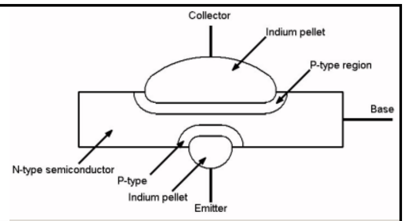


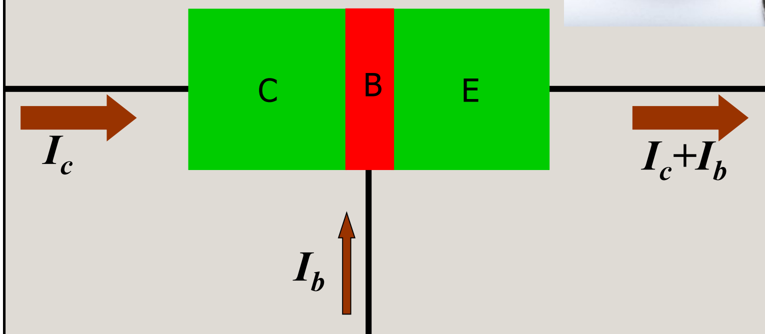
Bardeen, Brattain & Shockley
(1956: Prêmio Nobel de Física)

20

O transistor:
- *transfer resistor*
- Dispositivo de chaveamento da corrente elétrica
- Dimensões reduzidas em relação às válvulas eletrônicas

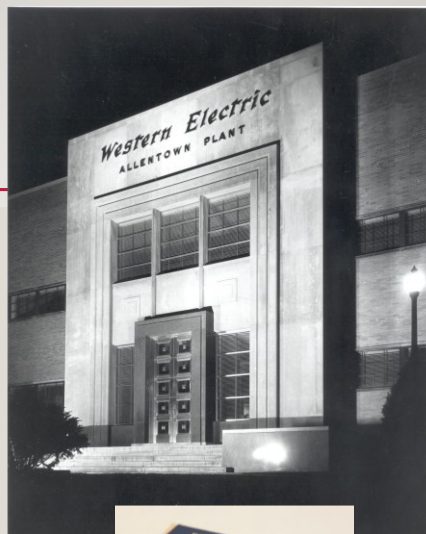






Uma pequena corrente possibilita o controle de uma grande corrente!

21



A partir de 1950 os transístores de germânio começaram a ser produzidos em série pela Western Electric, braço industrial da AT&T, em Allentown. Esta fábrica havia sido projetada para a produção de válvulas e teve uma parte adaptada para a fabricação de transístores.

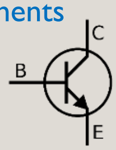
No entanto, no início os transístores eram somente destinados a uso próprio em equipamentos de telecomunicações da própria Western Electric. Nos raros casos em que eram comercializados, a Western Electric cobrava de US$16 a US$25 por cada transístor.

22

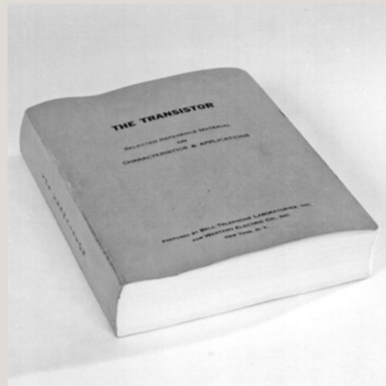
OS PRIMEIROS TRANSÍSTORES

1952: A *Western Electric* inicia o licenciamento da fabricação de transístores a empresas interessadas

- RCA
- GE
- Raytheon
- Sylvania
- Texas Instruments
- Philco (Ford)
- Motorola
- …..



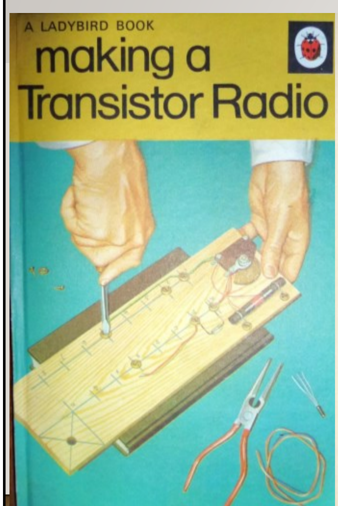
Licença: US$ 25 mil
Curso de 9 dias
1ª turma 1952: 40 empresas

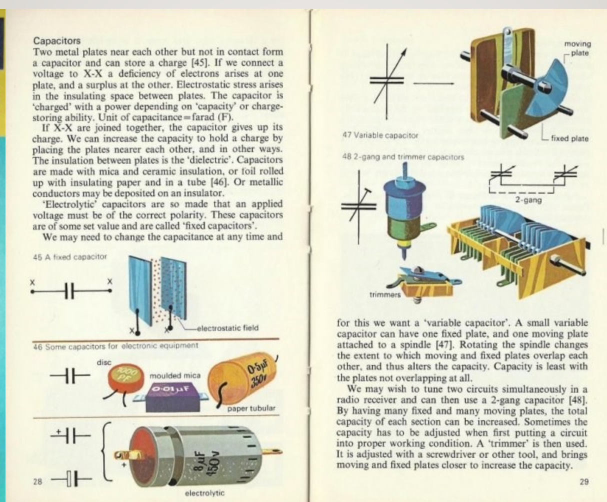


23

OS PRIMEIROS TRANSÍSTORES

Transístor OC71 fabricado em 1954 pela Mullard Ltd na Inglaterra





Capacitors

Two metal plates near each other but not in contact form a capacitor and can store a charge [45]. If we connect a voltage to X-X a deficiency of electrons arises at one plate, and a surplus at the other. Electrostatic stress arises in the insulating space between plates. The capacitor is 'charged' with a power depending on 'capacity' or charge-storing ability. Unit of capacitance = farad (F).

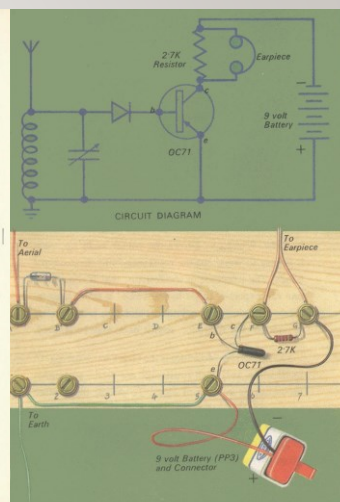
If X-X are joined together, the capacitor gives up its charge. We can increase the capacity to hold a charge by placing the plates nearer each other, and in other ways. The insulation between plates is the 'dielectric'. Capacitors are made with mica and ceramic insulation, or foil rolled up with insulating paper and in a tube [46]. Or metallic conductors may be deposited on an insulator.

'Electrolytic' capacitors are so made that an applied voltage must be of the correct polarity. These capacitors are of some set value and are called 'fixed capacitors'.

We may need to change the capacitance at any time and for this we want a 'variable capacitor'. A small variable capacitor can have one fixed plate, and one moving plate attached to a spindle [47]. Rotating the spindle changes the extent to which moving and fixed plates overlap each other, and thus alters the capacity. Capacity is least with the plates not overlapping at all.

We may wish to tune two circuits simultaneously in a radio receiver and can then use a 2-gang capacitor [48]. By having many fixed and many moving plates, the total capacity of each section can be increased. Sometimes the capacity has to be adjusted when first putting a circuit into proper working condition. A 'trimmer' is then used. It is adjusted with a screwdriver or other tool, and brings moving and fixed plates closer to increase the capacity.

28 29

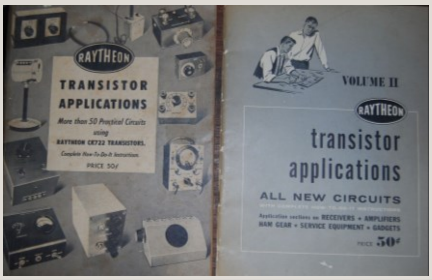


24

Raytheon CK722:

- PNP germânio
- 1953: US$ 7.60
- 1954: US$ 3.50

  A *Raytheon* assume a liderança mundial fabricação de transístores
- 1956: US$ 0.99
- anúncios em revistas de eletrônica
- concurso de projetos
- à venda nas lojas RADIO SHACK



Aparelho de Surdez Zenith, 1953
Com 3 transístores Raytheon
Preço: **US$ 100**

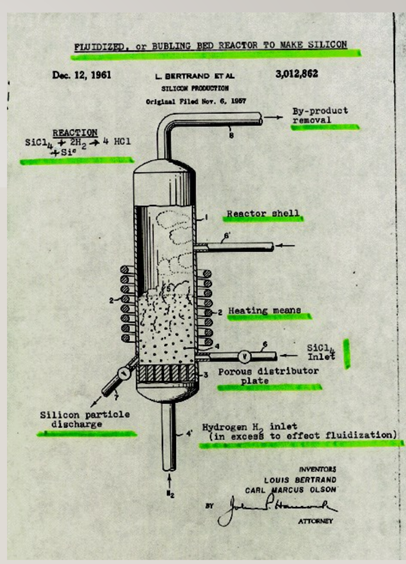
25

O TRANSÍSTOR DE SILÍCIO

1953: Carl Marcus Olson, na empresa DuPont (EUA) consegue produzir silício em grau de pureza elevado (0,001% de impurezas).

Janeiro 1954: Morris Tanenbaum fabrica protótipos de transístores de silício no Bell Labs, com silício "grau eletrônico" fornecido pela DuPont, mas a direção da Western Electric, de forma surpreendente, não se interessa em produzi-los industrialmente.

1954: Gordon Teal, que havia pedido demissão do Bell Labs para trabalhar na Texas Instruments (Dallas, Texas, EUA) apresenta o primeiro transistor de silício disponível comercialmente.

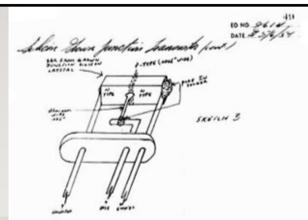


https://spectrum.ieee.org/tech-history/silicon-revolution/the-lost-history-of-the-transistor

26

Texas Instruments

- 1930: *Geophysical Service*
- II Guerra Mundial: detector de submarinos por anomalia magnética
- 1951: *General Instruments* muda de nome para *Texas Instruments* (Dallas, Texas, EUA)
- 1952: TI compra a licença de fabricação do Transístor
- Gordon Teal: deixa o *Bell Labs* → emprego na *TI*
- 1953: Início da produção de transístores na *TI* (Ge): US$ 2.50
- 1953: A empresa *DuPont* consegue produzir silício em grau de pureza elevado.
- Janeiro 1954: Morris Tanenbaum fabrica protótipos de transístores de silício no *Bell Labs*, com silício "grau eletrônico" fornecido pela *DuPont*, mas a direção da *Western Electric* não se interessa em produzi-los industrialmente
- 1954: Gordon Teal apresenta o primeiro transistor de silício disponível comercialmente
- Durante alguns anos como única empresa com tecnologia para a fabricação de transístores de silício, a *TI* assume a liderança mundial na fabricação de semicondutores (que era até então da *Raytheon*)



Instruções de montagem do transistor de silício da *TI*

27

28

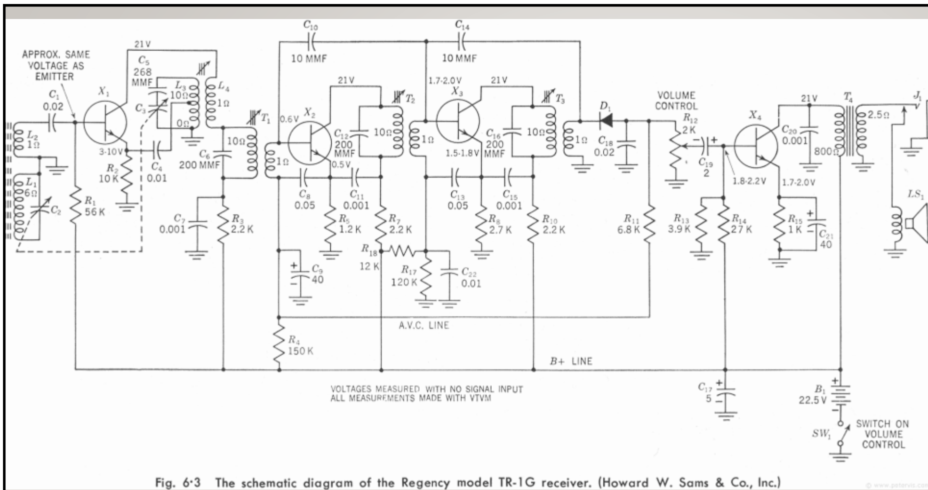


Fig. 6·3 The schematic diagram of the Regency model TR-1G receiver. (Howard W. Sams & Co., Inc.)

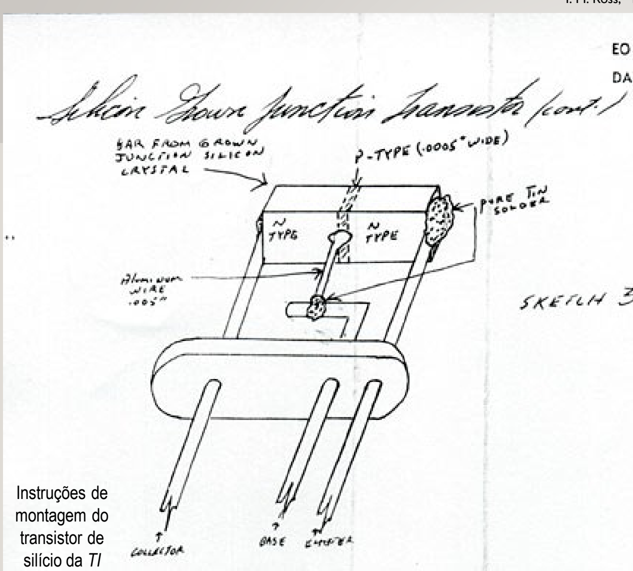
Diagrama esquemático do circuito eletrônico do rádio portátil modelo TR-1G marca *REGENCY*
Cada rádio usava 4 transístores de germânio fabricados pela *Texas Instruments.* Apesar de ter mais de 100 mil unidades vendidas, o rádio tinha sintonia difícil, baixa qualidade de áudio e a bateria de 22,5V era cara.

https://www.petervis.com/Radios/am-pocket-radio-solid-state/circuit-diagrams/early-pocket-radio-circuit-diagram-large-image.gif

29

TRANSÍSTOR DE SILÍCIO (TEXAS INSTRUMENTS)

I. M. Ross, "The invention of the transistor," in Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 1, pp. 7-28, Jan. 1998, doi: 10.1109/5.658752.



Instruções de montagem do transistor de silício da *TI*

30

Os primeiros transistores:

Motorola, Chicago

- 1928: Irmãos Galvin: Carregadores para baterias – *Galvin Manufacturing Corporation*
- 1930: “Radiola” (RCA) para automóveis: MOTOROLA
- 1935: Equipamento de rádio para a polícia de Chicago
- 1942: II Guerra Mundial: *Equipamento militar de rádio*
- 1947: Assume o nome *Motorola Inc.*
- 1952: Licença do Transistor
- 1956: Início da fabricação de Transistores

31

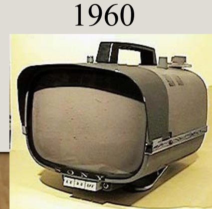
Os primeiros transistores:

- 1946: Akio Morita & Masaru Ibuka criam a Tokyo Tsushin Kogyo
- 1954: a empresa compra a licença do Transistor da Western Electric Ibuka viaja para os EUA para fazer o curso do Bell Labs
- 1954: Com a assessoria técnica de Leo Esaki (Universidade de Tokio) a empresa produz transístores a baixo custo (*Esaki: Prêmio Nobel, 1973*)
- 1955: Rádio SONY TR55 lançado nos EUA: US$ 29.95
- 1957: Rádio SONY TR68
- 1958: a empresa adota o nome SONY
- 1960: a SONY lança o primeiro aparelho portátil de TV do mundo
- 1975: gravador de vídeo Betamax (fracasso mundial...)
- 1979: o “Walkman”
- 1980: o CD, em parceria com a Philips (Holanda)
- 1990: PlayStation

1955

1957

1960



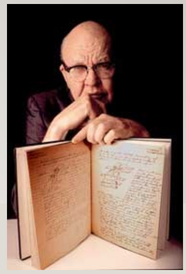
1979

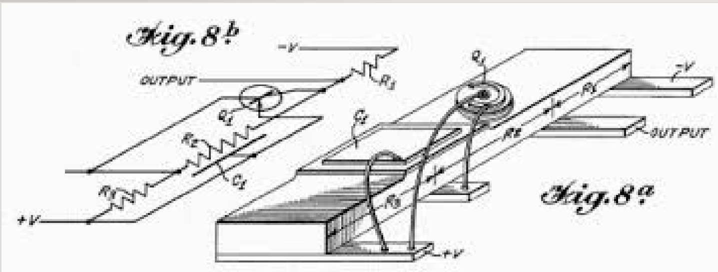
32

Texas Instruments

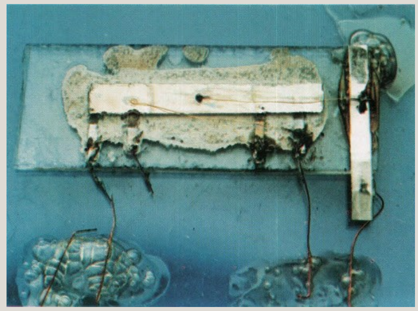
1958: Jack Kilby

- Concepção do circuito integrado
- Fabricação experimental de um protótipo em 1959





- Polêmica: a Patente de Jack Kilby é mais um "*system in a package*"(SIP) do que um verdadeiro "circuito integrado"!



Protótipo em Ge

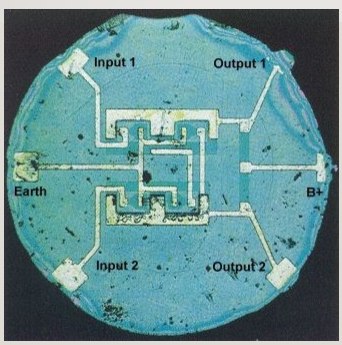
33

Fairchild Semiconductor

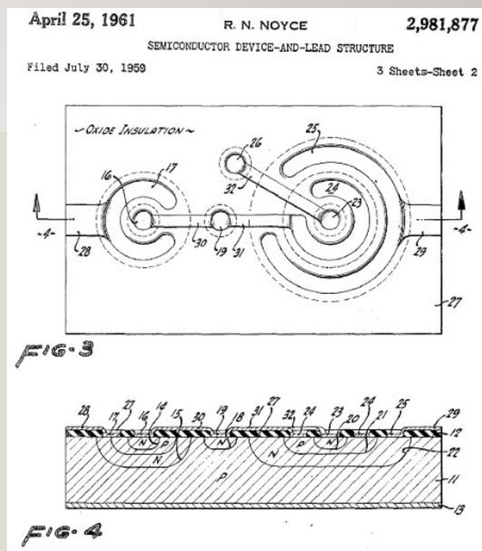
1958: Jean Hoerni: método epitaxial para fabricação de transistores

1959: Robert Noyce: circuitos integrados em Si

Robert "Bob" Noyce



1959: Primeiro CI Fairchild, com 4 transistores, em substrato de silício e fabricação epitaxial



34

35