

Vorlesung 1- zusätzliches Thema Entwicklung der Halbleitertechnologie

- Aus dem IEEE Paper: “The Invention of the Transistor”, Ian M. Ross
- Es gab komplexe Elektronik auch vor der Erfindung des Transistors (1947)
- **Elektronenröhren** oder elektromechanische **Relais**
- Radio (FM, AM), Mikrowellen, kleine Radioempfänger, Fernsehen, Faxgeräte, Video- und Audiorekorder, Computer gab es ohne Transistoren
- Im Sommer 1945, Mervin Kelly gründet die Gruppe am **Bell Labor** mit dem Ziel Untersuchung von Halbleitern und Suche nach dem Ersatz für Elektronenröhren und Relais
- *Kelly’s vision triggered one of the **most remarkable technical odysseys** in the history of mankind, a journey that has continued through 50 (75) years. The semiconductor odyssey produced **a revolution in our society at least as profound as the introduction of steel, of steam engines, and the total industrial revolution***
- *Electronics today pervades our lives and affects everything we do, whether at work or at home*

- Es gab zwei Bauteile mit ähnlicher Funktion vor der Erfindung von Transistoren:
- **Relais**
- Das Magnetfeld wird benutzt um ein Stück Metall zu bewegen und Kontakt zwischen den Elektroden herzustellen
- Kleine Leistung im Magnet steuert viel größere Leistung in der Kontaktschaltung an
- Nachteil – langsam ~ms
- **Elektronenröhren**
- Elektronen werden von einer heißen Glühkatode emittiert und fliegen im Vakuum zur positiven Anode
- Elektronenfluss wird mit dem Potential an der Gitter-Elektrode angesteuert
- **Elektronenröhren** funktionieren wie Schalter und Verstärker, sie sind schnell
- Nachteile:
- DC-Leistung (wegen Heizung)
- Kürze Lebensdauer (Vakuum)
- Größe
- Ein Halbleitertransistor sollte zuverlässiger sein (kein Vakuum, keine Glühkathoden)

- Bell Labors – NJ/USA
- Gruppe: Shockley, Brattain, Bardeen (Bardeen 2 x Nobelpreis – Transistor/Supraleiter)
- Ziel: Entwicklung des Transistors
- Damaliger Stand der Technik und Wissenschaft:
- Grundlagen der Halbleiterphysik bekannt (p, n, Energiebänder), Dotierungstechnik bekannt
- *In the case of germanium, it was Theuerer who first identified the presence of phosphorus as an n-type agent as a result of smelling traces of phosphine during ingot preparation*
- Erste PN Dioden hergestellt
- Beste Siliziumqualität 99.8%, polykristalline Pulver, keine große Kristalle verfügbar



John Bardeen, William Shockley, and Walter Brattain.

- Anfangsidee: Feldeffekt-Transistor (FET). Die Idee war seit 1925 bekannt (Erfinder: Lilienfeld) aber nie realisiert
- Das E-Feld sollte die Leitfähigkeit vom Halbleiter verändern
- 1946 Entscheidung: die Gruppe konzentriert sich auf FET aus Si oder Ge

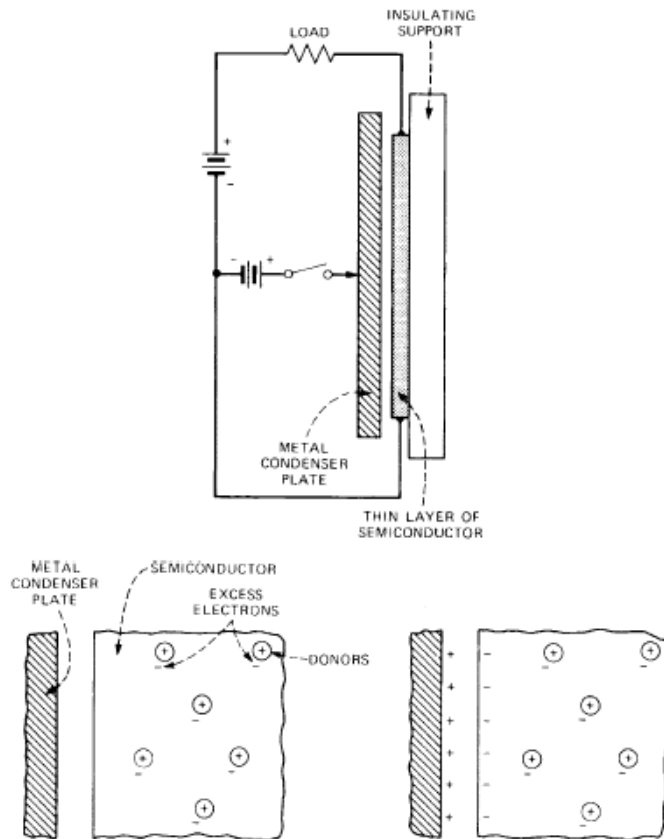
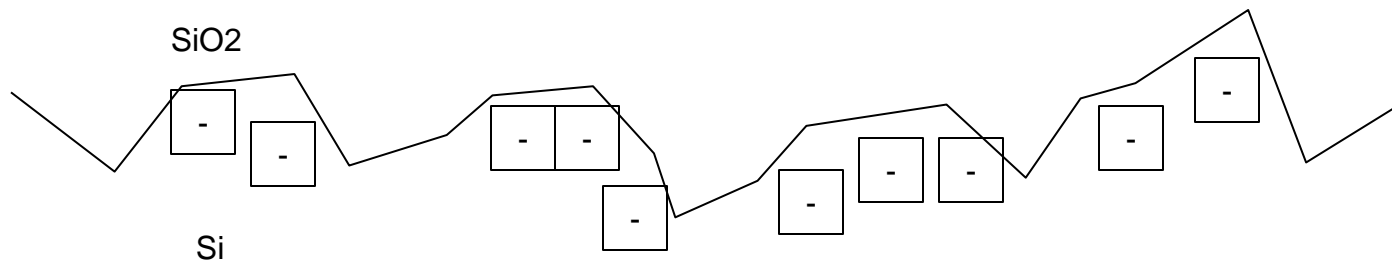
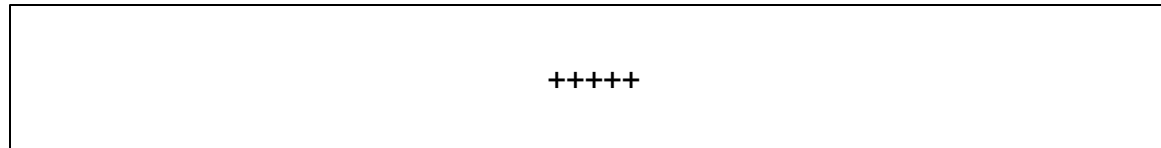


Fig. 1. Schematic of Shockley's field-effect idea. [12]

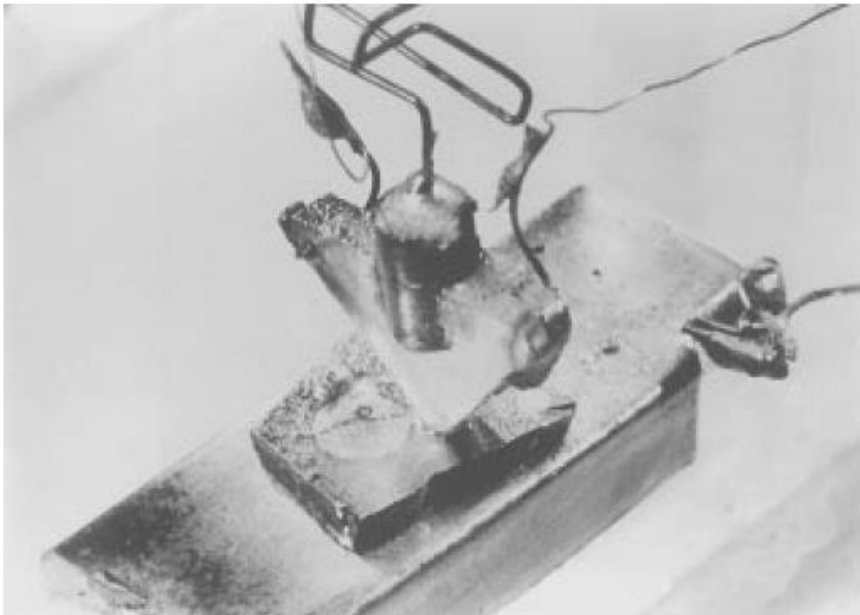
FET: Skizze von Schockley

- Kein Ergebnis... ☹️
- Erklärung von Bardeen:
- Schlechte Qualität von der Halbleiteroberfläche -> Quantenzustände („Fallen“) -> unbewegliche Ladung
- Die Ladung an der Halbleiteroberfläche schirmt das E-Feld ab
- Die Forscher versuchen die Qualität der Oberfläche zu verbessern...

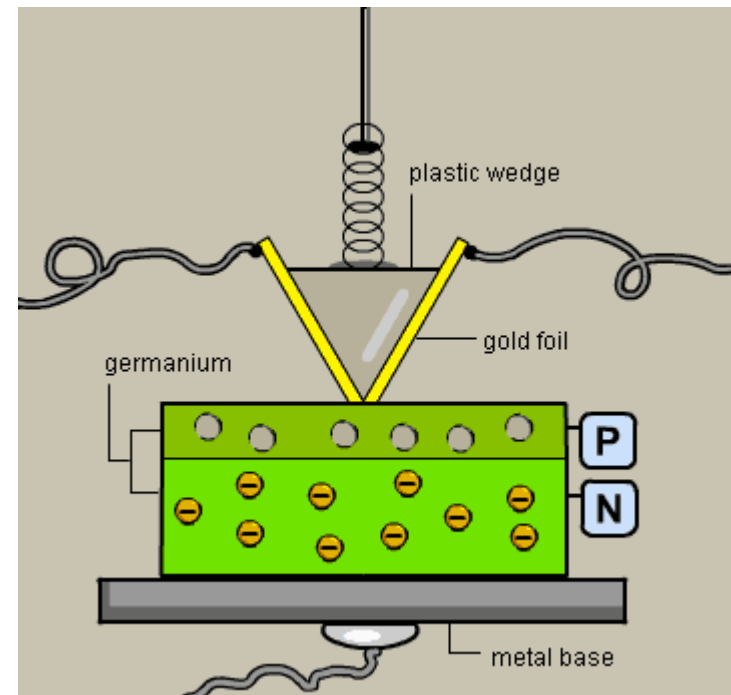


- Dezember 1947
- Der erste Transistor war ein sogenannter „Spitzentransistor“
- Er besteht aus einem Keil, mit zwei goldenen Metallschichten (Emitter, Kollektor)
- Germanium Basis
- Ein Kontakt ist in Durchlassrichtung gepolt, der andere in Sperrrichtung

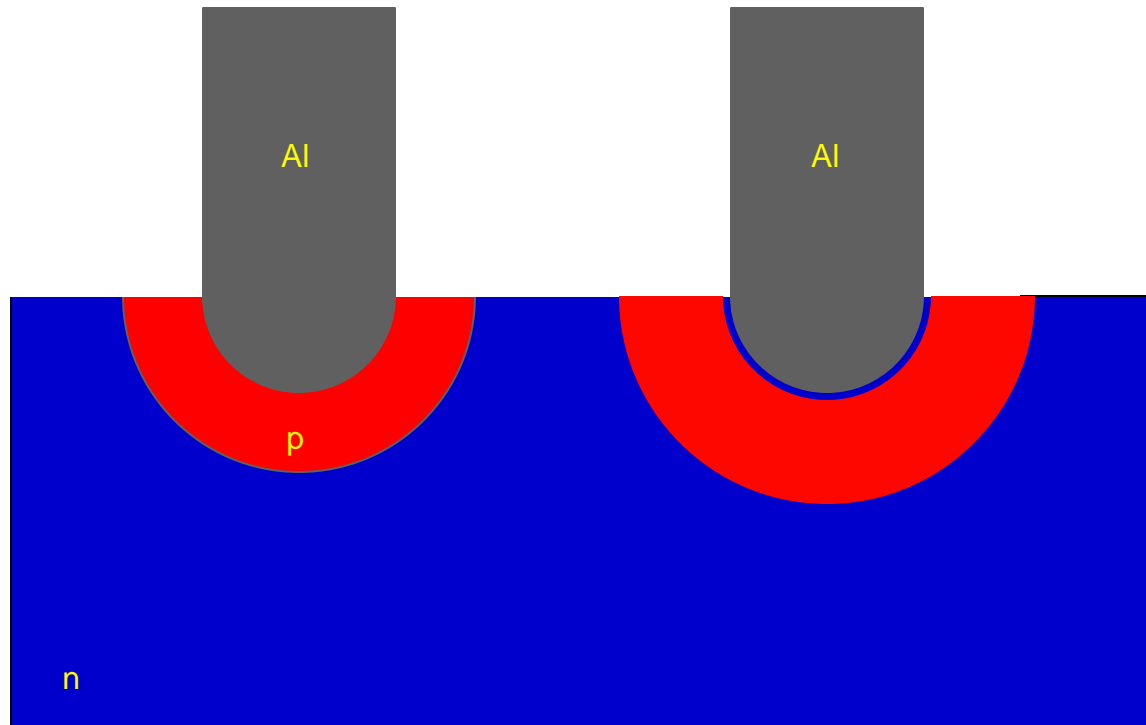
Original-Foto



Prinzip

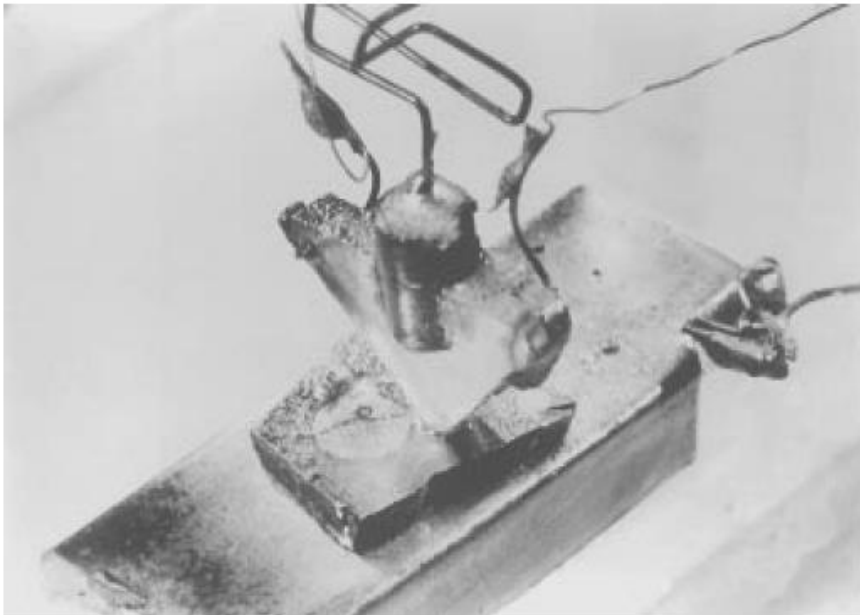


- <https://de.wikipedia.org/wiki/Spitzentransistor>
- Durch starke Stromstöße wird der Einkristall unter der Spitze aufgeschmolzen und rekristallisiert dann wieder. Es bleiben aber Fehlstellen im Kristallgitter übrig, die wie eine p-Dotierung wirken und eine Sperrschicht zum Einkristall ausbilden.

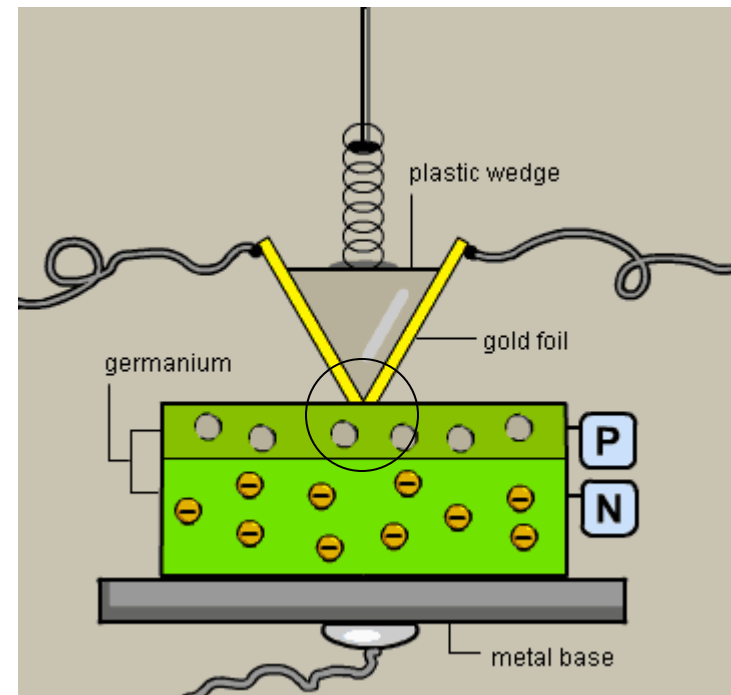


- „Transistoreffekt“ wird gemessen
- 100x Leistungsverstärkung, Audioverstärker wurde gebaut
- Brattain, Bardeen dachen, dass es sich um die Oberflächeneffekte, also FET, handelt

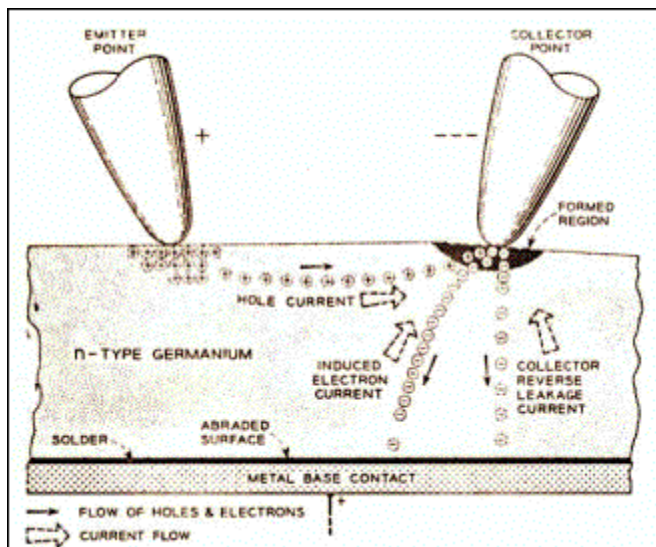
Original-Foto



Prinzip

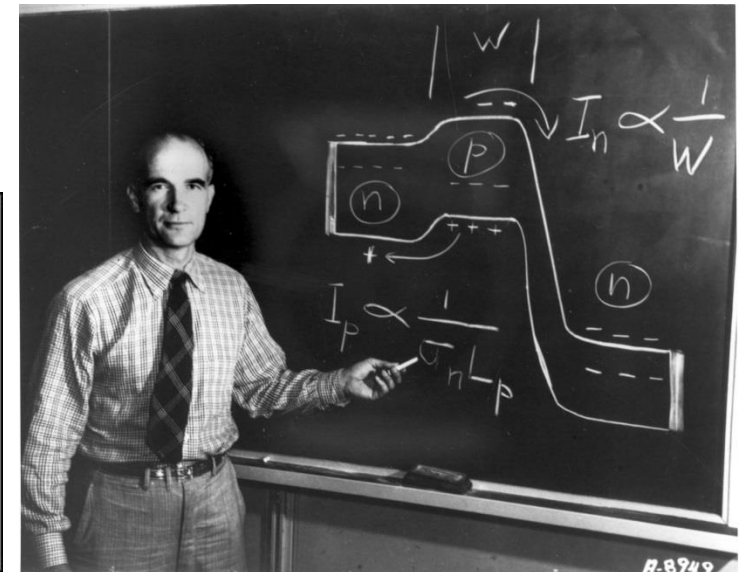
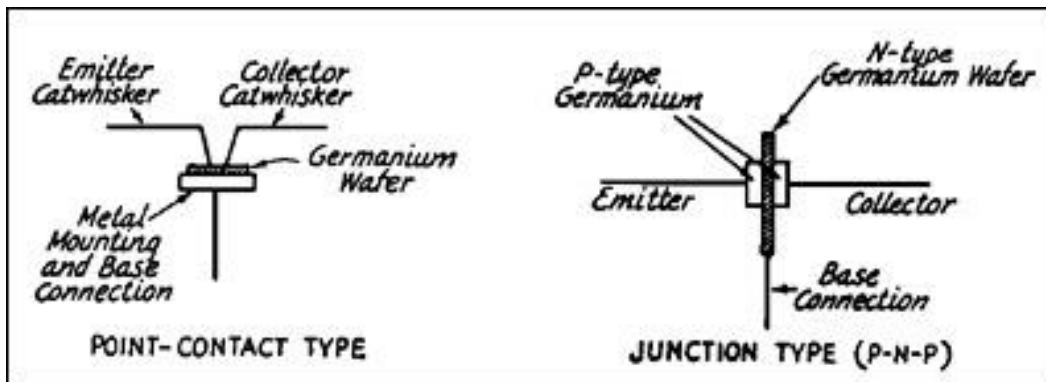


- Shockley vermutete etwas anderes:
- Die Injektion von Minoritätsträger (Löcher) aus dem P-Typ Emitter in die N-Basis
- Die Minoritätsträger können zum Kollektor diffundieren falls der N-Bereich zwischen goldenen Elektroden schmal genug ist
- Er entwickelte innerhalb von Wochen die Theorie von bipolaren Transistoren
- Ein Beweisexperiment wurde vorgeschlagen



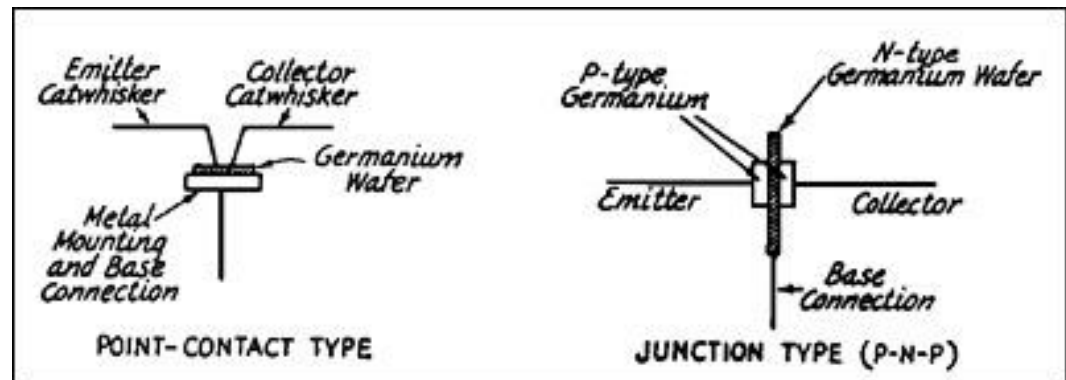
- Anfang 1948: J. Shive - erster gezogener (junction) Transistor
- Aufbau: zwei Phosphorbronze Kontakte auf verschiedenen Seiten vom 0.1mm dickem Germanium
- Transistoreffekt – es ist nun offensichtlich ein Substrateffekt - der lange Weg auf der Oberfläche schließt Oberflächeneffekte aus
- *After Shive's presentation, Shockley went to the blackboard and described his recently developed theory of the junction transistor. The Shockley theory nicely explained Shive's observations.*

https://de.wikipedia.org/wiki/Gezogener_Transistor

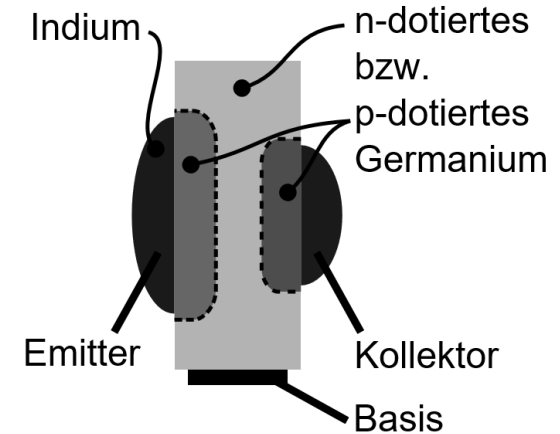
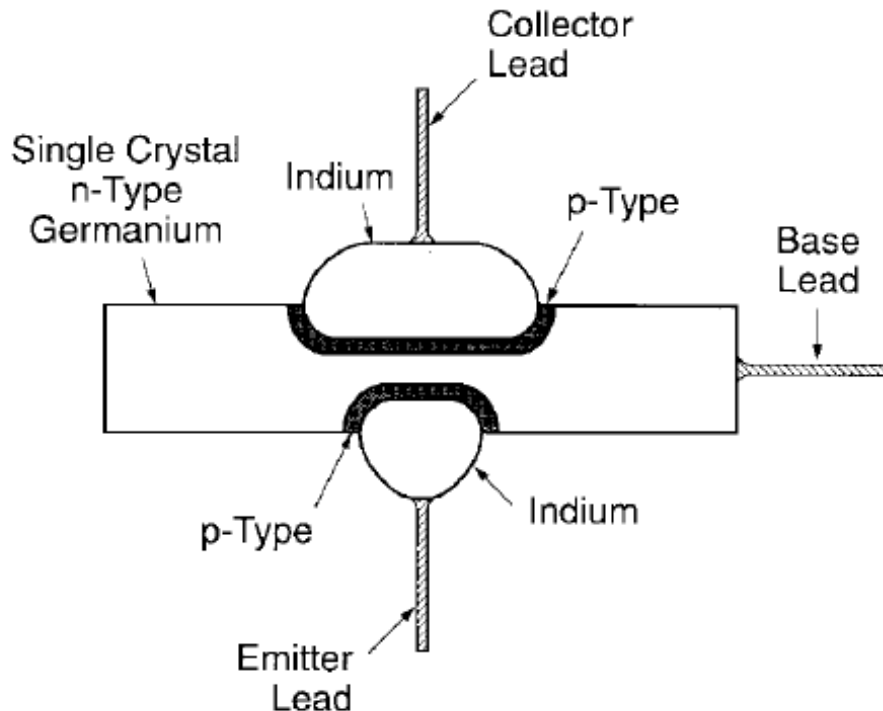


- Die Gruppe hat die Germanium-Verarbeitung weiterentwickelt (Czochralski Methode) (Gordon Teal)
- Die Parameter wie Mobilität, Lebenszeit, Diffusion wurden gemessen
- Die Techniken für Dotierung wurden verbessert, NPN Stäbe hergestellt
- Bell Labor hat die Ergebnisse und ein Buch (Shockley) veröffentlicht, Kurse organisiert
- Die Entdeckung wurde innerhalb von 5 Jahren verstanden und dokumentiert
- Wissenschaftliche Phase war damit abgeschlossen. Ab jetzt sollten die Ingenieure Innovationen vorantreiben.

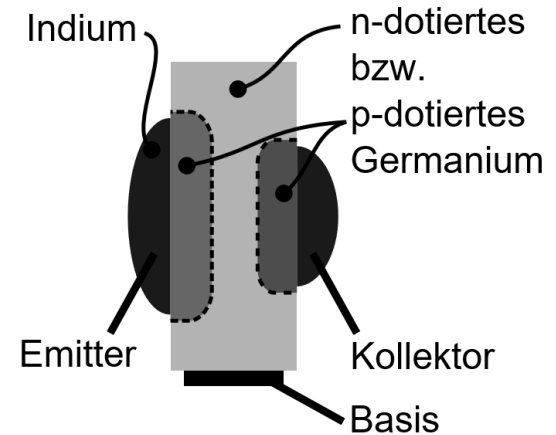
- Anfangs 1951 existieren zwei Strukturen die **wenig für** Serienproduktion geeignet waren
- **Der Spitzentransistor** (point contact transistor) wurde zwar in Geräten benutzt aber die Produktion ist schwierig zu kontrollieren
- **Junction**-transistor - gute Prozesskontrolle
- Basisteil (P-Typ) wird auf den Kristallen gewachsen (Czochralski Methode)
- Zwei Kristalle mit jeweils einem Basis-Teil werden verbunden
- Der Prozess kann nicht automatisiert werden
- https://de.wikipedia.org/wiki/Gezogener_Transistor
- Im ersten Schritt wird der **Schmelze** eines Halbleiters wie **Germanium** ein n-dotierender Fremdstoff wie **Phosphor** zugesetzt. Dieser Fremdstoff wird während des Kristallziehens in den Halbleiterkristall eingebaut und bewirkt in entsprechender Menge eine n-Dotierung mit dem notwendigen/gewünschten elektrischen Widerstand für den späteren Kollektorbereich. Nachdem der Kristall eine ausreichende Länge erreicht hat, wird der Schmelze ein p-dotierender Stoff wie **Bor** zugesetzt. In entsprechender Menge kann so die Dotierung von n-leitend auf p-leitend geändert werden. Da für die Funktion des Transistors die Basisweite verhältnismäßig klein sein muss, wächst der Kristall in diesem Schritt nur sehr gering (ca. 30 μm). Im dritten Schritte erfolgt das Ziehen des n-dotierten Emitterbereichs. Dazu wird der Schmelze abermals in ausreichende Menge eines Fremdstoffs zugefügt, der eine n-Dotierung bewirkt.



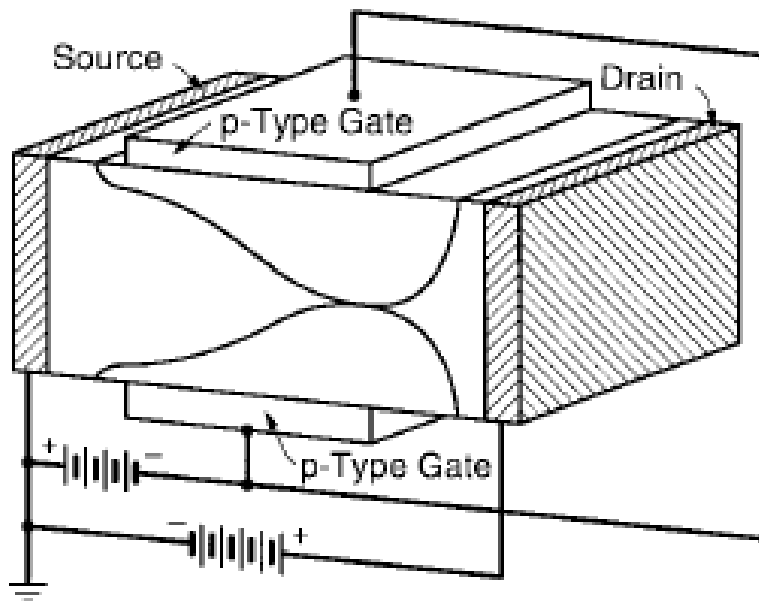
- 1952 J. E. Saby hat at General Electric den ersten Alloy Junction Transistor hergestellt
- Aufbau: N-Typ Germanium und zwei Indium Punkte (P-Typ) auf verschiedenen Seiten
- Erster Transistor, der einfach und serienmäßig hergestellt werden konnte
- Zuerst werden Kristalle hergestellt, Kristall-Scheiben geschnitten, Indium Kontakte gemacht (mit Schablonen) und die einzelnen Transistoren ausgesägt.



- <https://de.wikipedia.org/wiki/Legierungstransistor>
- Im ersten Schritt **wird je eine Pille (kleine Kugel) aus dreiwertigem Metall** auf eine Seite eines n-dotiertes Halbleiterplättchens (das Substrat, in der Regel Germanium) **aufgebracht**. Im zweiten Schritt wird das Substrat mit den aufgetragenen Emitter- und Kollektorpillen **einer Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur des Metalls**, aber unterhalb der des Halbleiters **ausgesetzt**. Dabei bildet sich an der Grenzfläche zwischen Substrat und Metall eine Legierung. Die Größe dieser Legierungsschicht nimmt dabei mit der Prozesszeit zu und die der dazwischen liegenden Transistor-Basis mit der Zeit ab. Der Temperaturprozess wird beendet, wenn Basis dünn genug ist, das heißt, der Transistor die gewünschten elektrischen Kenndaten aufweist. Im letzten Fertigungsschritt wird der Basis-Kontakt hergestellt.



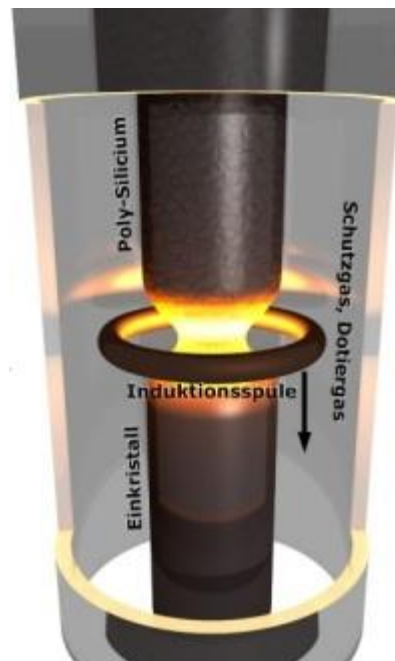
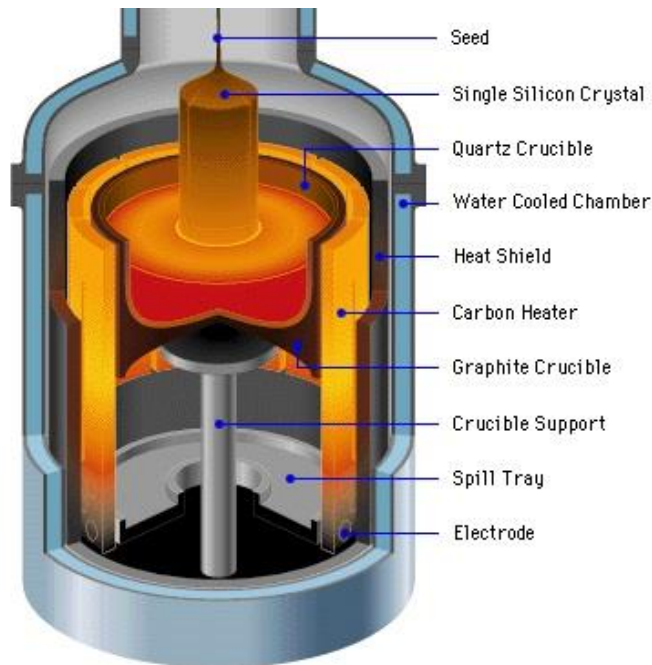
- Der erste Feldeffekt-Transistor (JFET) wurde mithilfe von alloy junction Struktur gemacht
- Shockley, G. C. Dacey, I. M. Ross (Bell Labors)
- Damals gab es keine Vorteile gegenüber Bipolar-Transistoren
- FET wird wieder (wie 1925) „vergessen“



I.M. Ross, front, and G.C. Dacey jointly responsible for this development measuring the characteristics of a field effect transistor

- Es war vom Anfang an klar, dass Silizium für Transistoren besser als Ge wäre
- Grund: höhere Bandlücke 1.1eV (Si) statt 0.67eV (Ge)
- Germanium: höhere Leckströme bei Sperrpolung
- Silizium wäre deutlich besser für Schalter, würde seine Eigenschaften auch auf höheren Temperaturen und Leistungen behalten
- Einige Nachteile von Silizium – niedrigere Mobilität $\sim 3x$ – kann durch kleinere Dimensionen kompensiert werden
- Ein größerer Nachteil von Silizium gegenüber Germanium ist es, dass die Chemische Prozesse auf deutlich höheren Temperaturen stattfinden
- Schmelztemperatur 1415C (Si), gegenüber 937C (Ge)
- Außerdem: Silizium ist chemisch deutlich reaktiver als Germanium
- Es ist schwer Materiale für Ofen zu finden, in den Silizium Kristalle hergestellt werden.
- Wegen dieser Schwierigkeiten war Germanium anfangs bevorzugt

- Anfang 50er gab es eine Reihe von Innovationen bei der Herstellung von reinen Silizium Kristallen
- Gordon Teal hat es gelungen die reinen Si Kristalle aus der Silizium Schmelze zu bekommen, er benutzte ein Impfkristall, der in die Schmelze eingetaucht wird und gezogen wird. Der Ofen war aus Quarz.
- Theurer und Pfann haben die Zonenschmelzverfahren (float zone) entwickelt. Damit lassen sich die Verunreinigungen aus Silizium (bzw. Germanium) entfernen.



- 1954 Gordon Teal bei Texas Instruments hat erste marktreife Siliziumtransistoren vorgestellt – Junction Methode
- <http://www.ti.com/corp/docs/company/history/timeline/semicon/1950/docs/54commercial.htm>
- *Semiconductor R&D chief Gordon Teal was scheduled to speak that day at the Institute of Radio Engineers National Convention in Dayton, Ohio.*
- *(T. had already built about 150 very good transistors)*
- *“During the morning sessions, the speakers had unwittingly set the stage for us. One after the other, ... remarked about how hopeless it was to expect the development of a silicon transistor in less than several years. They advised the industry to be satisfied with germanium transistors for the present.*
- *As Teal began his presentation, he read through 24 of the 31 pages without mentioning his team's achievement at TI. The crowd was less than attentive...*
- *Then Teal dropped his bombshell.*
- *“Contrary to what my colleagues have told you ...,” he began. His message stunned everyone who heard it: Silicon transistors were a fact. TI was producing them.... I happen to have a few in my pocket....*

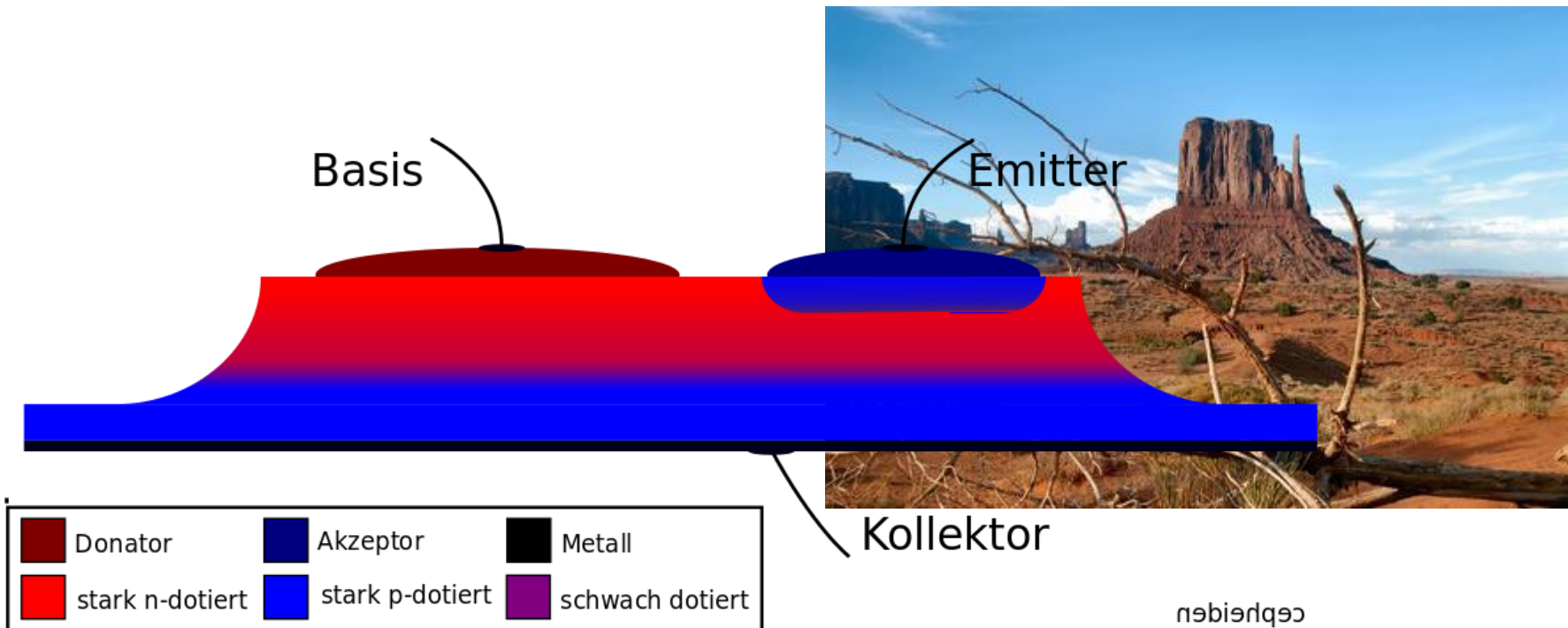


- Anfangs dachte man dass Silizium nur in digitalen Schaltungen (als Schalter) dominieren und Germanium in der analogen Elektronik „die erste Wahl“ bleiben wird.
- Mit der Entwicklung von Siliziumtechnologie wurde Germanium mehr und mehr verdrängt
- Heute verwenden nur Nischenprodukte Germanium

- Ein großes Problem von den ersten Transistoren war niedrige Geschwindigkeit – das war die Folge von einer langen Transitzeit (der Elektronen) durch Basis-Kontakt.
- Diese Zeit war hauptsächlich wegen der Größe der Basis in den ersten Transistoren lang. 10 μm Basislänge führt zu einer Grenzfrequenz von 10MHz.
- 1952 wurde erkannt dass man Donator-Ionen auch durch **Diffusion** von der Oberfläche des Halbleiters implantieren kann, und auf diese Weise dünne Bereiche erzeugen kann. Erste Verfahren haben Dämpfe mit Donator-Ionen verwendet. Man konnte auf diese Weise die Dicke des dotierten Bereichs genau kontrollieren.



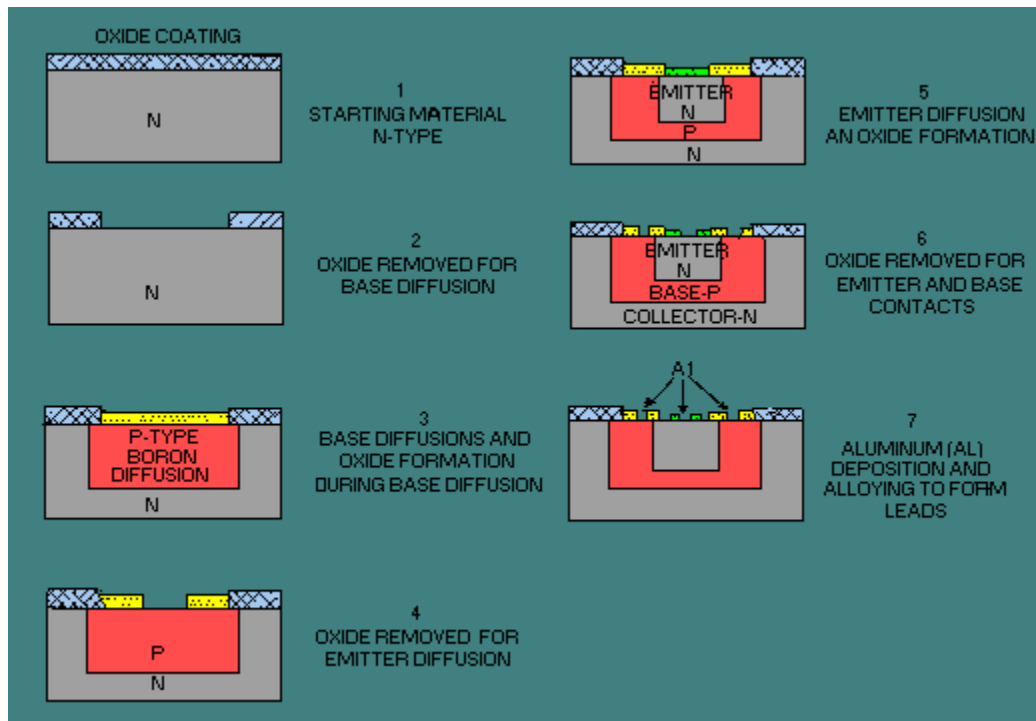
- 1954 wurde der erste Germanium Diffusionstransistor hergestellt (Charles A. Lee) – „Mesa“ Transistor
- Lee nahm p-dotiertes Kristall, erzeugte n-Basis durch Diffusion mit Arsen ($1.5\mu\text{m}$) und dann Emitter (p-Typ) indem er Aluminium in n-Bereich diffundierte.
- Zur Verbesserung der elektrischen Eigenschaften (Reduzierung von Sperrschicht-Kapazitäten) werden nun die oberen Schichten des Transistors nasschemisch geätzt



εβιηρϑε

- Es konnten auf diese Weise die Basisdicken von $1\mu\text{m}$ erreicht werden und für Germaniumtransistoren die Frequenzen von 500MHz
- Ein Jahr später wurde auch der erste Silizium Mesa Transistor mit einer Grenzfrequenz von 120MHz hergestellt

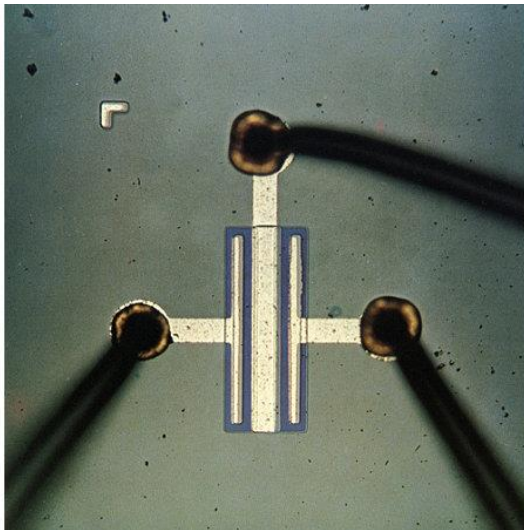
- Weitere Erfindung 1955
- SiO₂ Lage auf der Oberfläche kann als die Maske für die Diffusion verwendet werden
-> „Geburt“ von Lithographie
- Fotolack wird für die Strukturierung von Oxid verwendet. Auf diese Weise werden Fenster in Oxid gemacht, die dann Diffusion auf diese Bereiche einschränken



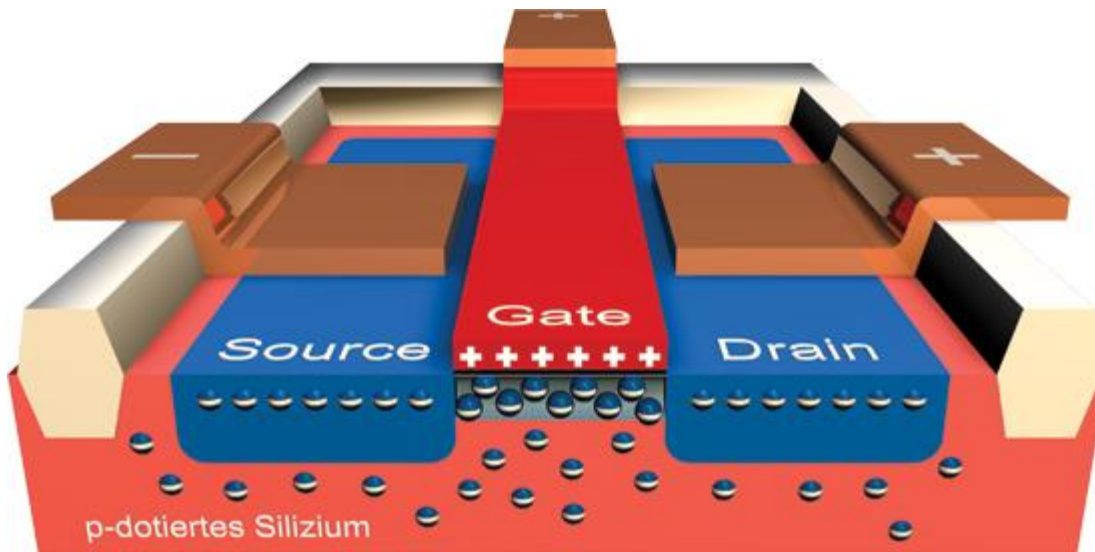
- Bald ist es möglich geworden die Diffusionsbereiche sowohl horizontal als auch vertikal zu kontrollieren
- Dies ermöglichte die Planartransistoren
- Diese Innovation beendete die Zeit des Germaniums. Es konnte kein Material gefunden werden, das die Diffusion ins Germanium maskiert. Die Germanium Oxide ist sehr brüchig und in Wasser löslich. So hatte Silizium einen entscheidenden Vorteil.

- SiO₂ hat auch ein weiteres Problem gelöst – es diente als eine Schutzlage und verhinderte, dass die Feuchtigkeit aus der Luft die Transistoren beeinflusst.
- Frühen Transistoren waren sehr feuchteempfindlich. Es dauerte 20 Jahre dies in Griff zu bekommen.

- M. M. Atalla und Dawon Kahng (Bell Labor) haben die Schutzwirkung von SiO_2 untersucht.
- 1959 ist es ihnen gelungen durch die Verwendung von SiO_2 die Dichte der Verunreinigungen an der Silizium-Oberfläche so zu verkleinern, dass sie der Feldeffekt erreicht konnte
- Der Feldeffekt Transistor basierend auf Metall-Oxid-Halbleiter (MOSFET) wurde zum ersten Mal erzeugt

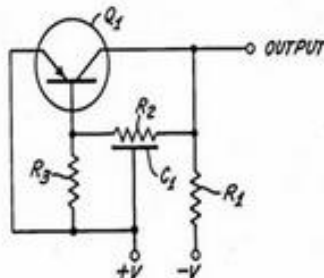
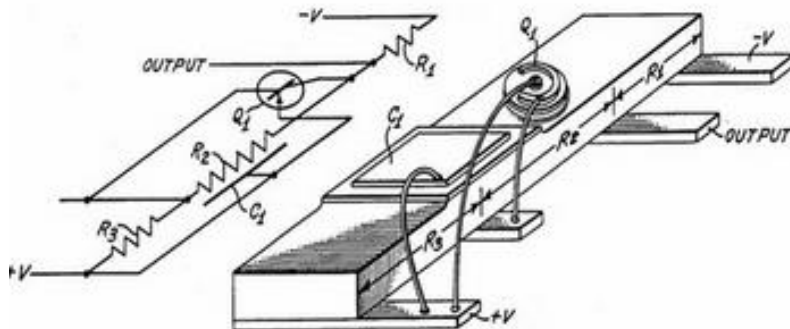


- Die ersten MOS Transistoren hatten schlechtere Eigenschaften als die Bipolartransistoren.
- Das Hauptproblem war die viel zu hohe Schwelle-Spannung. Dies konnte durch Silizium Gates verbessert werden.

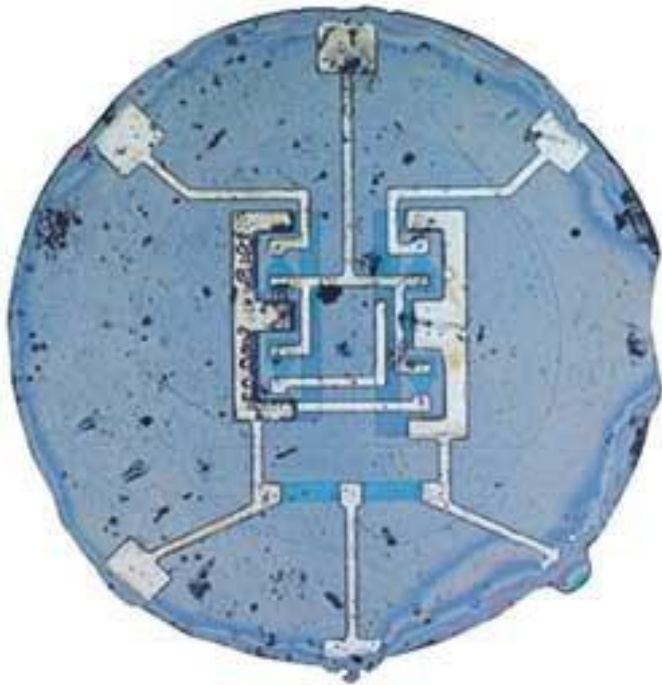


- Ab 1960 werden Planartransistoren serienmäßig hergestellt – alle Kontakte sind auf der Oberseite.
- Die Kontakte werden durch die Öffnungen im Oxid gemacht. (Moore and Noyce)
- Alle grundlegende Technologien für die Herstellung von integrierten Schaltungen waren da.
- Die erste IC wurde von Kilby (TI) in 1958 hergestellt. Seine erste Schaltungen hatten etwa zehn Komponenten (Transistoren, Dioden, Kondensatoren und Widerstände) und wurden mit Drahtbonds verbunden.

Kilby's germanium IC



- Drahtbonden war nur die vorläufige Lösung, und Kilby hat in seinem Patent vorgeschlagen die Metallleitungen auf die Oxid-Isolierung per Abscheidung zu erzeugen.
- Ähnliche Idee hatte auch Noyce (Fairchild), unabhängig von Kilby.
- Noyce hat später Intel gegründet

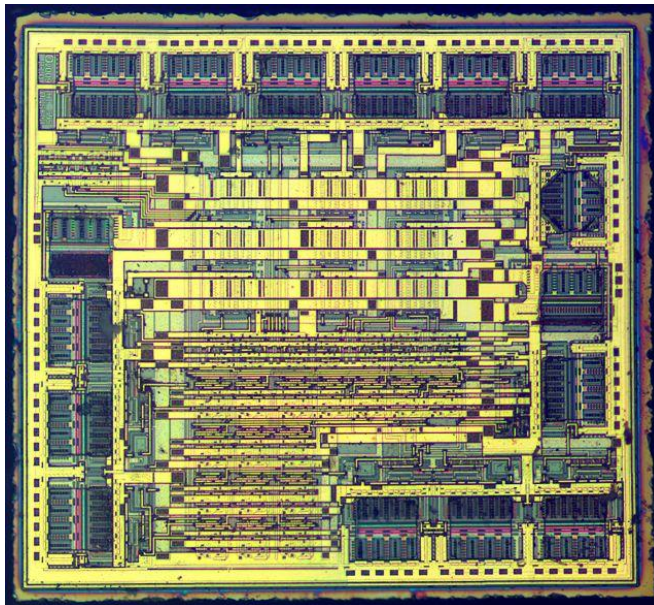


Flip-flop – TR Logic



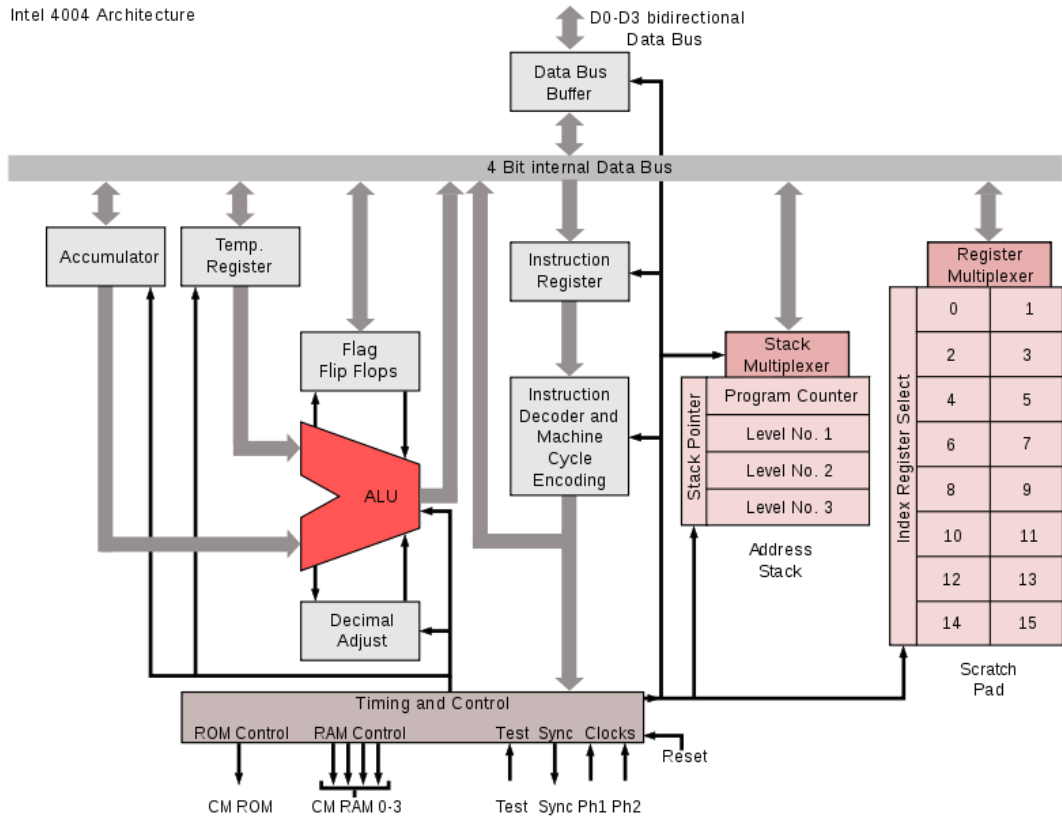
- Es ist interessant dass die Kilbys Idee am Anfang wenig Zustimmung in der Industrie hatte. Man hat argumentiert, dass die ICs schlechte Ausbeute hätten wegen vielen Komponenten und gab es Sicherheitsbedenken.
- Wenn ein Transistor 90% Ausbeute hätte, hätte die ganze IC nur 0.9 hoch die Zahl von Transistoren.
- Man hat nach den Alternativen für ICs gesucht – z.B. nach funktionalen Bauteilen die viele Transistoren ersetzen können. Ein Beispiel ist der Quarzoszillator, ein anderes CCD.
- Es hat sich aber gezeigt, dass die ICs deutlich robuster als gedacht sind. Die Ausbeute war keine Zufallsvariable. Es gab immer Bereiche auf der Siliziumscheibe mit 100% Ausbeute.

- Es musste aber die Entscheidung über die beste Transistorart für IC fallen.
- Es war klar dass ein Planartransistor für ICs optimal ist. Ein MOS Transistor ist dabei besonders praktisch da seine Struktur einfach ist. Er ist kleiner als Bipolartransistor. Man kann auf einer IC deutlich mehr MOSFETs herstellen. **Dazu hat auch die Erfindung von CMOS beigetragen (Wanlass 1963)**
- Es ist interessant dies historisch zu betrachten. Das Konzept FET besteht seit 1925. FET wurde zweimal hergestellt und wieder vergessen. Erst mit der Entwicklung von ICs, 40 Jahre nach der Entdeckung des Konzepts, bekommt MOSFET die Hauptrolle in Elektronik

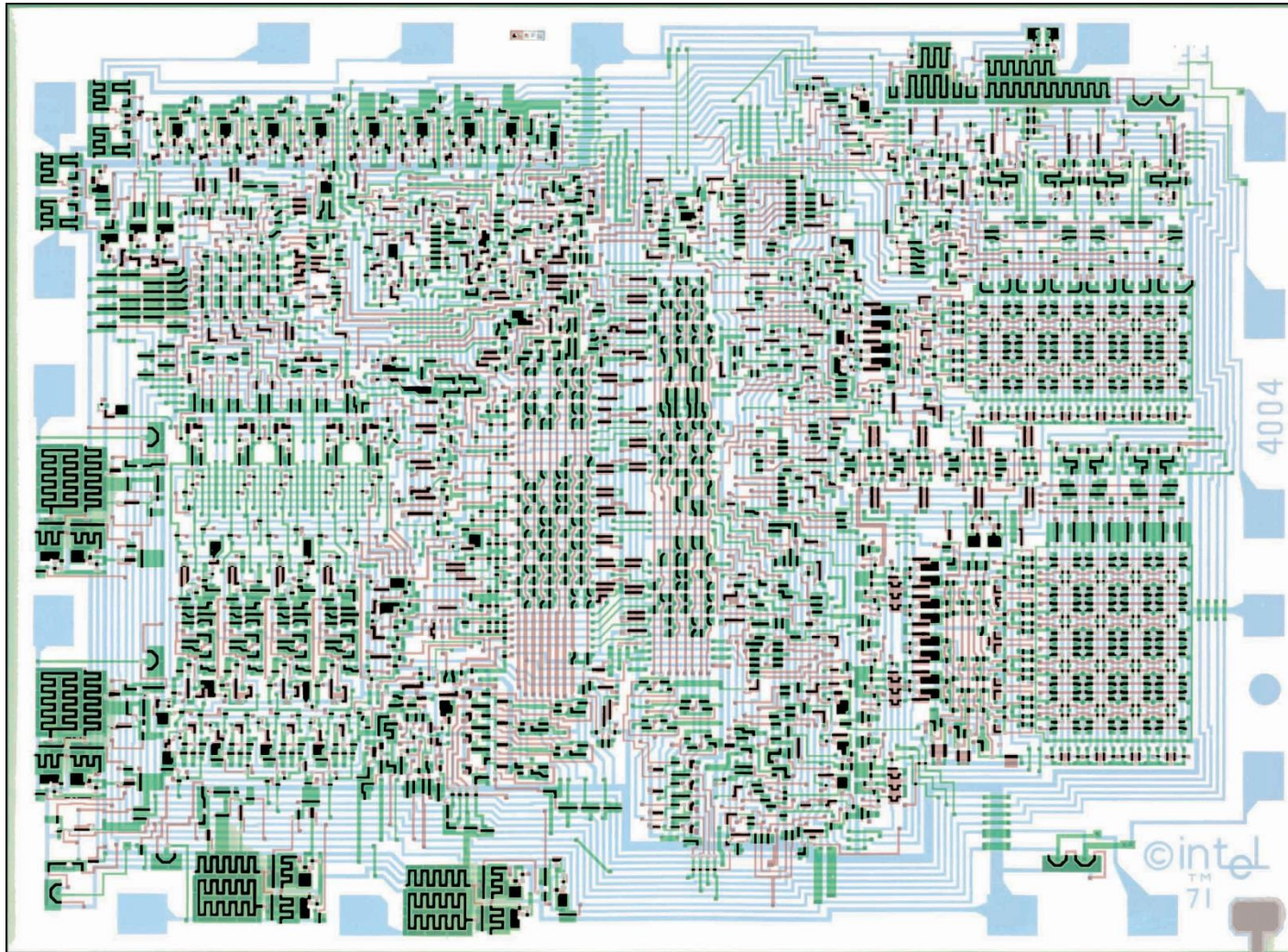


Die of a 74HC595 8-bit [shift register](#)

- 1971: Erster Mikroprozessor Intel 4004 wurde gemacht
- Paper: William Aspray „The Intel 4004 Microprocessor: What Constituted Invention? “

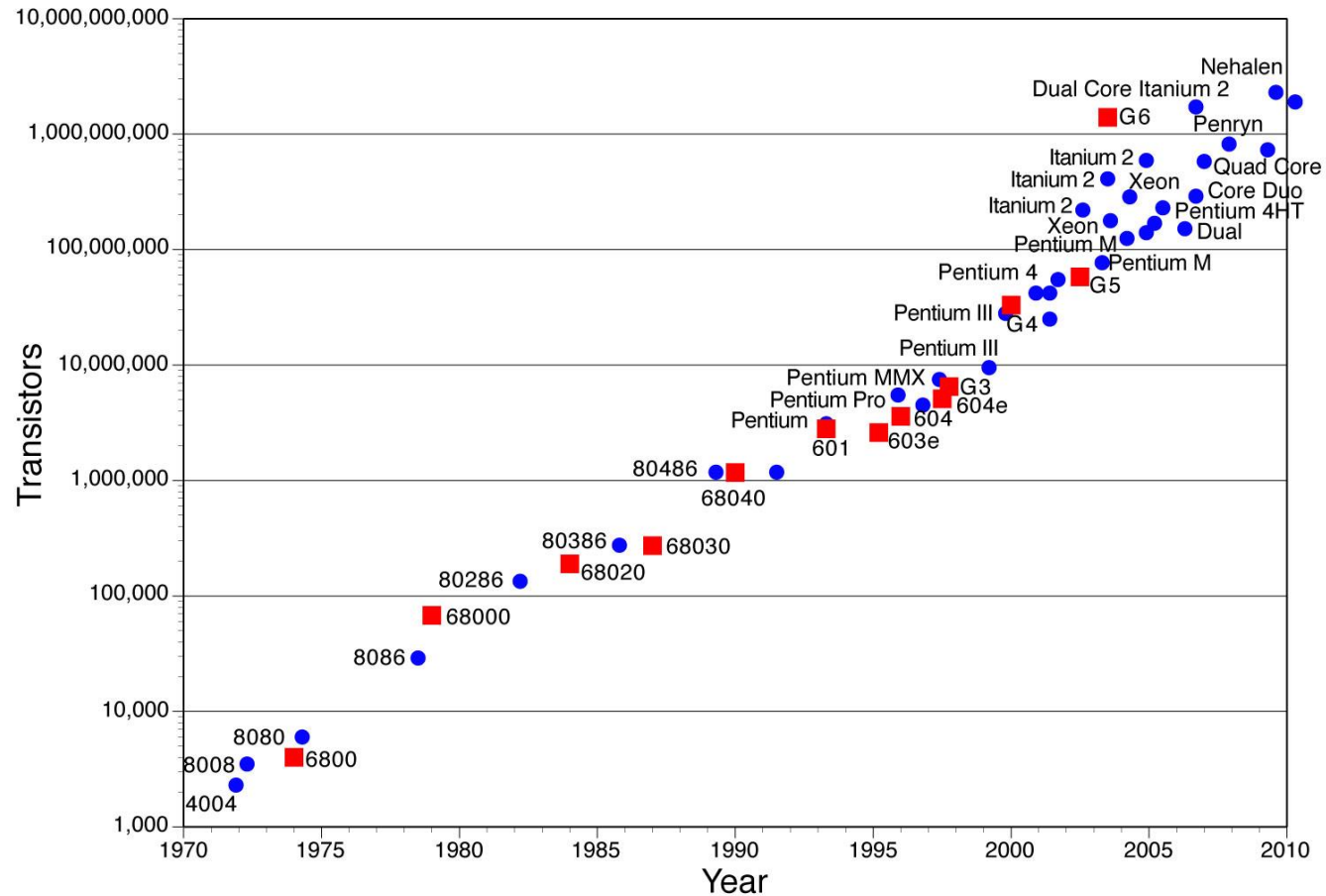


- 1971: Erster Mikroprozessor Intel 4004



Moore's law

- Seit dem Anfang der ICs verdoppelt sich die maximale Zahl der Transistoren etwa 18 Monate. Diesen Trend hat Moore schon in 1965 erkannt, und er setzt sich bis heute vor.



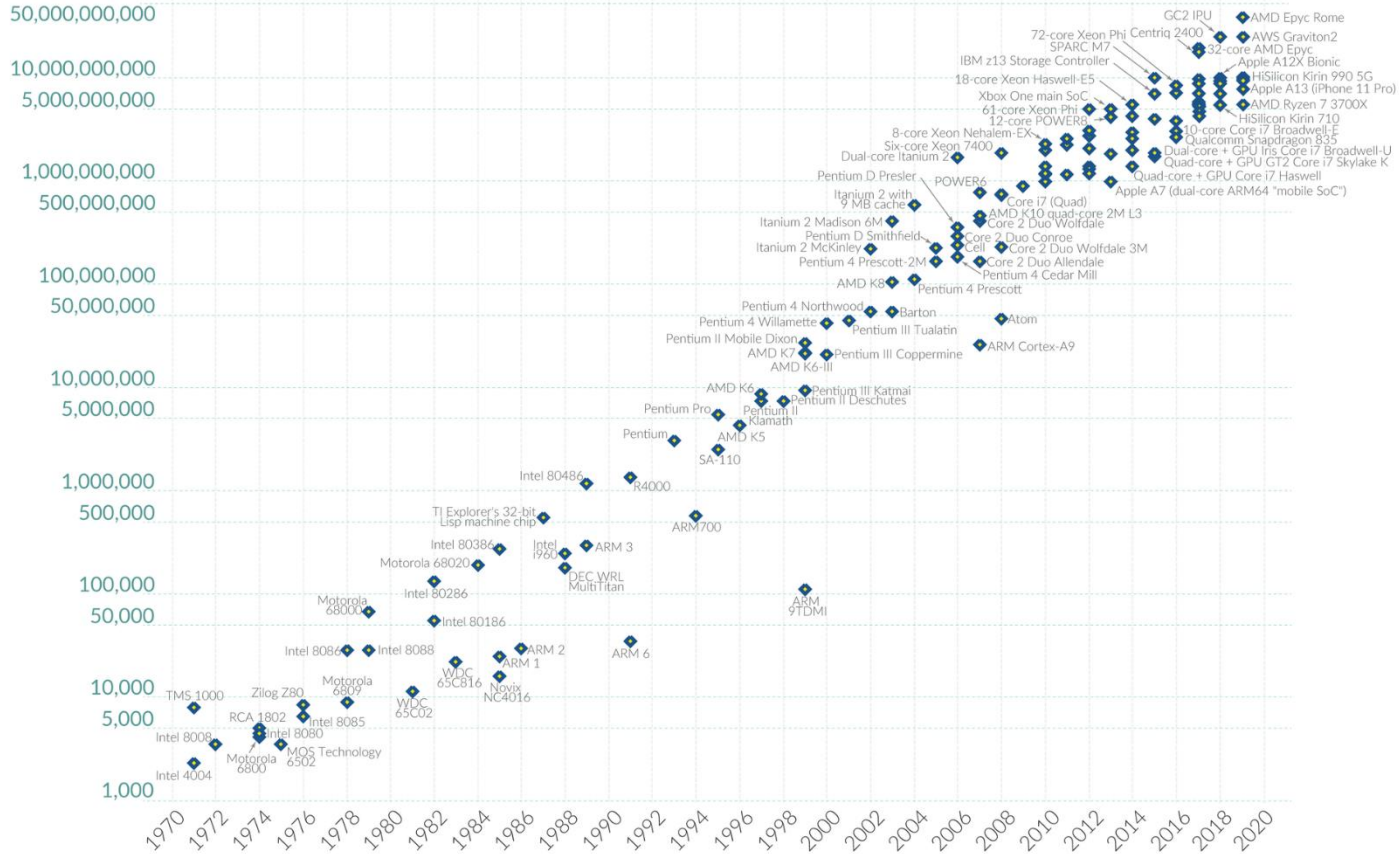
- Moore's law - Wikipedia

Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years



Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.

Transistor count

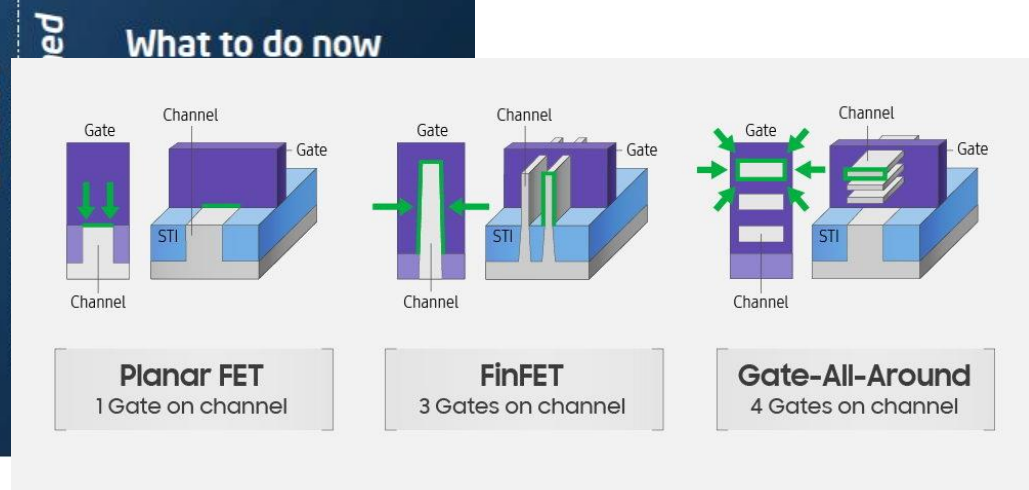
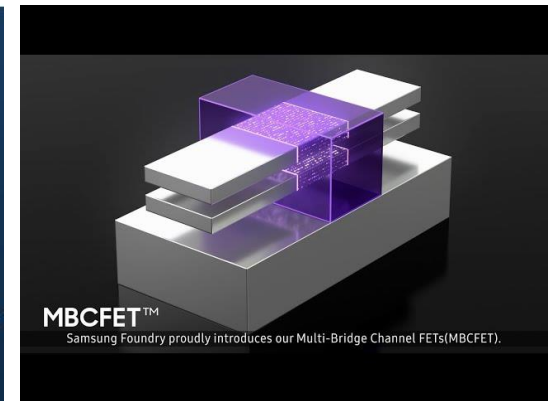
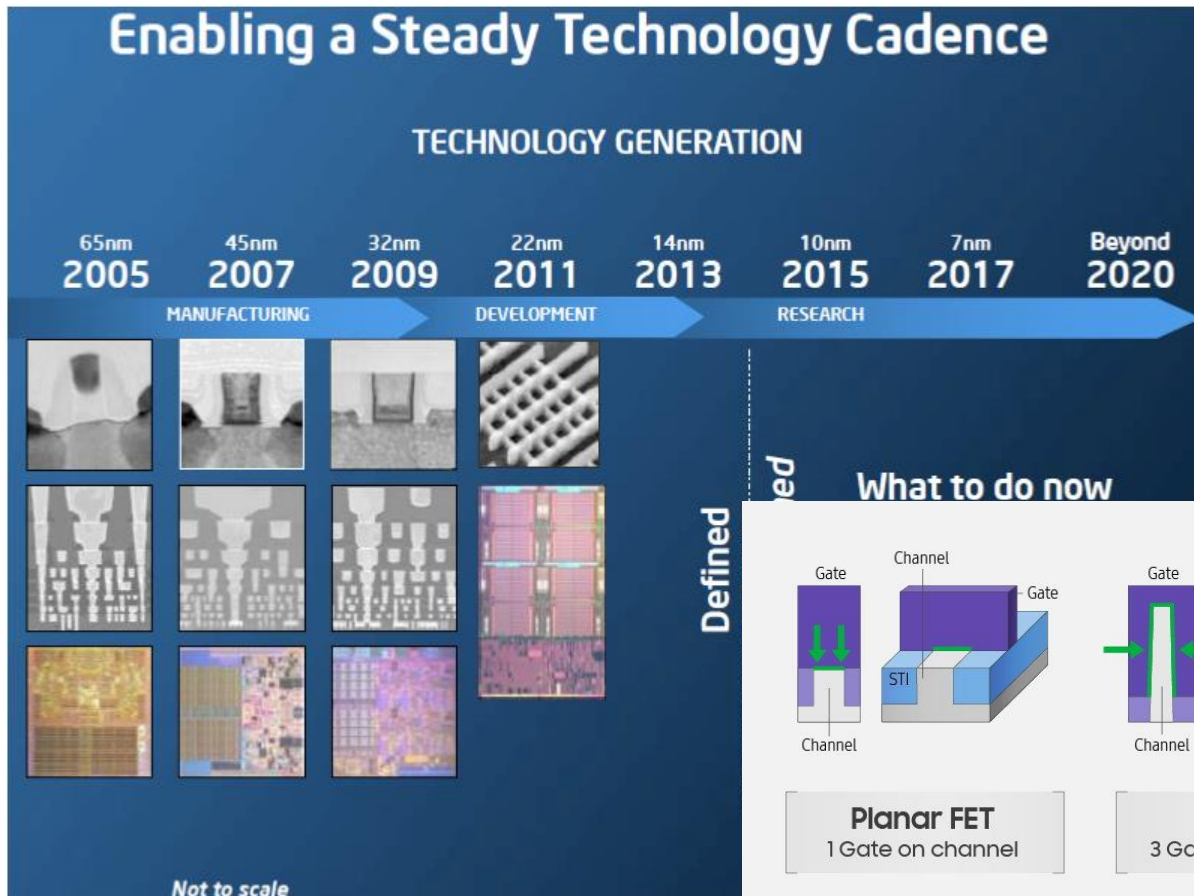


Data source: Wikipedia (wikipedia.org/wiki/Transistor_count) Year in which the microchip was first introduced

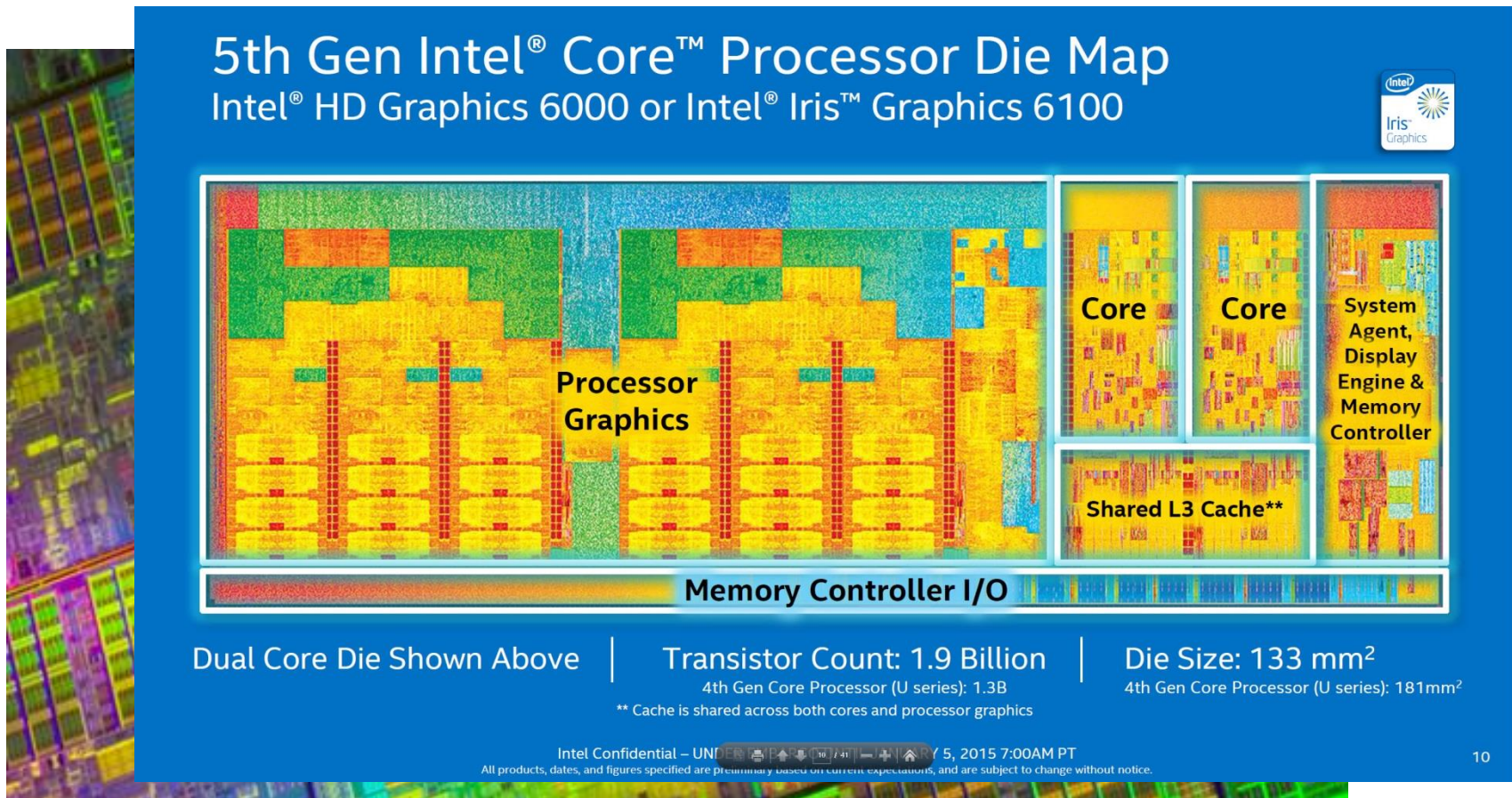
OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

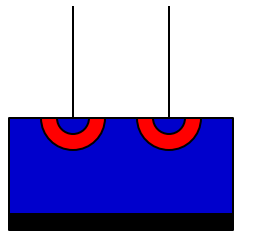
- Seit dem Anfang der ICs verdoppelt sich die maximale Zahl der Transistoren etwa 18 Monate. Diesen Trend hat Moore schon in 1965 erkannt, und er setzt sich bis heute vor.



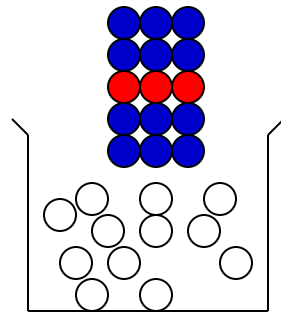
- Seit dem Anfang der ICs verdoppelt sich die maximale Zahl der Transistoren etwa 18 Monate. Diesen Trend hat Moore schon in 1965 erkannt, und er setzt sich bis heute vor.



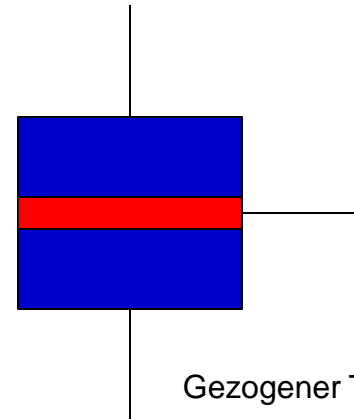
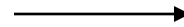
- Zusammenfassung



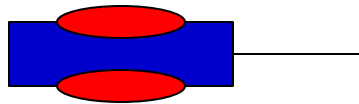
Spitzentransistor



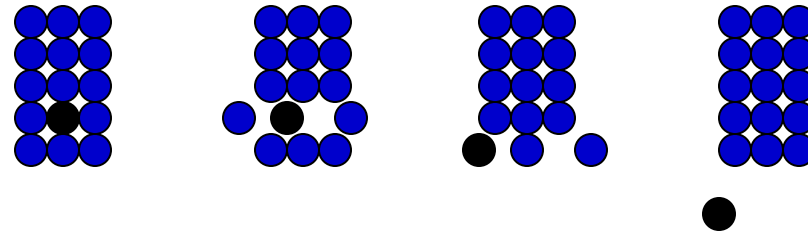
Czochralski-Verfahren



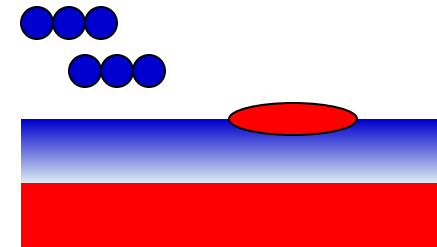
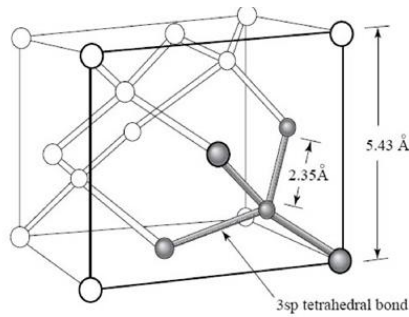
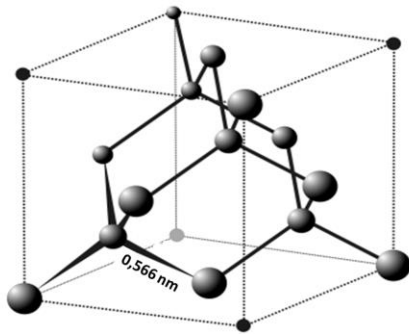
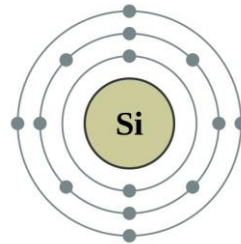
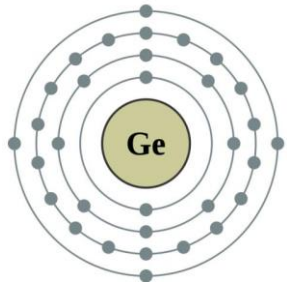
Gezogener Transistor



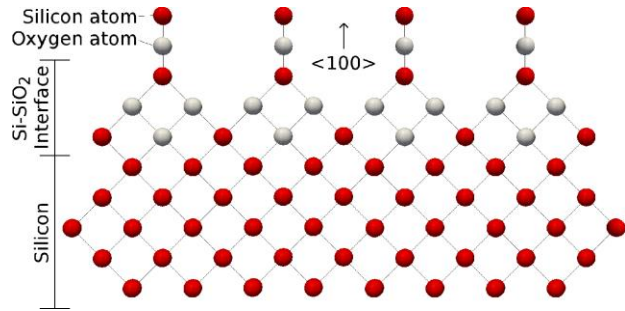
Legierungstransistor



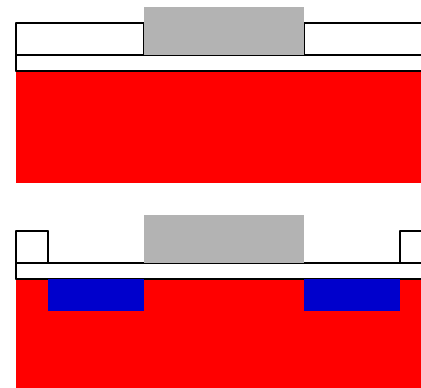
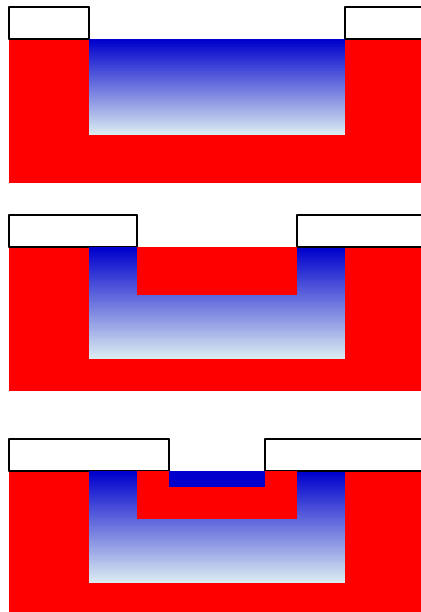
Float Zone



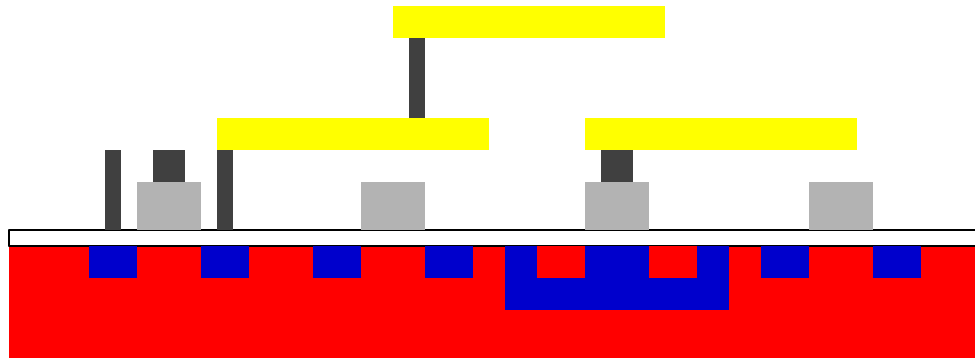
Diffusionstransistor



Oxide-Masken und Fotolithographie



MOS Transistor



Integrierte Schaltung

- 1926: Field Effect Semiconductor Device Concepts Patented
- Julius Lilienfeld files a patent describing a three-electrode amplifying device based on the semiconducting properties of copper sulfide. Attempts to build such a device continue through the 1930s.
- 1931: "The Theory Of Electronic Semi-Conductors" is Published
- Alan Wilson uses quantum mechanics to explain basic semiconductor properties. Seven years later Boris Davydov (USSR), Nevill Mott (UK), and Walter Schottky (Germany) independently explain rectification.
- 1940: Discovery of the p-n Junction
- Russell Ohl discovers the p-n junction and photovoltaic effects in silicon that lead to the development of junction transistors and solar cells.
- 1947: Invention of the Point-Contact Transistor
- John Bardeen & Walter Brattain achieve transistor action in a germanium point-contact device in December 1947.
- 1948: Conception of the Junction Transistor
- William Shockley conceives an improved transistor structure based on a theoretical understanding of the p-n junction effect.
- 1948: The European Transistor Invention
- Herbert Mataré & Heinrich Welker independently create a germanium point-contact transistor in France.
- 1951: First Grown-Junction Transistors Fabricated
- Gordon Teal grows large single crystals of germanium and works with Morgan Sparks to fabricate an n-p-n junction transistor.
- <http://www.computerhistory.org/>

- 1951: Development of Zone Refining
- William Pfann and Henry Theurer develop zone refining techniques for production of ultra-pure semiconductor materials.

- 1952: Bell Labs Licenses Transistor Technology
- Bell Labs technology symposia and licensing of transistor patents encourages semiconductor development.

- 1952: Transistorized Consumer Products Appear
- Semiconductors appear in battery-powered hearing aids and pocket radios where consumers are willing to pay a premium for portability and low power consumption.

- Intermetall Corp. of Dusseldorf, West Germany, co-founded by Herbert Mataré (1948 Milestone), gave a public demonstration of a radio powered by four point-contact transistors at the Dusseldorf Radio Fair in 1953.

- 1953: Transistorized Computers Emerge
- A transistorized computer prototype demonstrates the small size and low-power advantages of semiconductors compared to vacuum tubes.

- 1954: Silicon Transistors Offer Superior Operating Characteristics

- 1954: Diffusion Process Developed for Transistors
- Following the production of solar cells using high-temperature diffusion methods, Charles Lee and Morris Tanenbaum apply the technique to fabricate high-speed transistors.

- 1955: Photolithography Techniques Are Used to Make Silicon Devices
- Jules Andrus and Walter Bond adapt photoengraving techniques from printing technology to enable precise etching of diffusion "windows" in silicon wafers.
- 1958: Silicon Mesa Transistors Enter Commercial Production
- 1958: All Semiconductor "Solid Circuit" is Demonstrated
- Jack Kilby produces a microcircuit with both active and passive components fabricated from semiconductor material.
- 1959: Invention of the "Planar" Manufacturing Process
- Jean Hoerni develops the planar process to solve reliability problems of the mesa transistor, thereby revolutionizing semiconductor manufacturing.
- 1959: Practical Monolithic Integrated Circuit Concept Patented
- Robert Noyce builds on Jean Hoerni's planar process to patent a monolithic integrated circuit structure that can be manufactured in high volume.
- 1960: First Planar Integrated Circuit is Fabricated
- Jay Last leads development of the first commercial IC based on Hoerni's planar process and Noyce's monolithic approach.
- 1960: Metal Oxide Semiconductor (MOS) Transistor Demonstrated
- John Atalla and Dawon Kahng fabricate working transistors and demonstrate the first successful MOS field-effect amplifier.

- 1963: Complementary MOS Circuit Configuration is Invented
- Frank Wanlass invents the lowest power logic configuration but performance limitations impede early acceptance of today's dominant manufacturing technology.
- 1964: First Commercial MOS IC Introduced
- General Microelectronics uses a Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) process to pack more transistors on a chip than bipolar ICs and builds the first calculator chip set using the technology.
- 1965: "Moore's Law" Predicts the Future of Integrated Circuits
- Fairchild's Director of R & D predicts the rate of increase of transistor density on an integrated circuit and establishes a yardstick for technology progress.
- 1971: Microprocessor Integrates CPU Function onto a Single Chip
- Silicon-gate process technology and design advances squeeze computer central processing units (CPU) onto single chips.