

## Benutzte Quellen

- Vorlesungen von Dr.-Ing. Vogelmann, Universität – Karlsruhe
- Vorlesungen von Dr.-Ing. Klos, Universität – Karlsruhe
- Vorlesungen von Dr.-Ing. Crokol, Universität – Karlsruhe
- <http://www.solarserver.de/wissen/photovoltaik.html#unt>
- <http://www.energiewelten.de/elexikon/lexikon/index3.htm>
- <http://www.elektronik-kompodium.de/sites>
- <http://www.prof-gossner.de/>
- <http://vcs.abdn.ac.uk/ENGINEERING/lasers/lasers.html>
- <http://people.fh-landshut.de/~gsh/>

## Benutzte Bezeichnungen

- Aufschrift der Thema, die zum ersten Mal erscheint
- Aufschrift der Thema, die schon bekannt ist

## Halbleiterelektronik

- **Entwicklung der Halbleiterelektronik**
- Halbleiterphysik
- Halbleiter Herstellung (Si)

## Entwicklung der Halbleiterelektronik

- 1871 ⇒ Entdeckung den Kristall-Detektor durch Ferdinand Braun
- 1938 ⇒ Entwicklung der Theorie der Halbleiter-Übergänge durch Schottky
- 1947 ⇒ Erfindung des bipolaren Transistors durch Bardeen, Brattain u Shockley
- 1954 ⇒ Erster bipolarer Silizium-Transistor (Texas Instruments)
- 1958 ⇒ Erster Thyristor (General Electric)
- 1958 ⇒ Erfindung des integrierten Schaltkreises durch Jack Kilby und Gordon Moore
- 1971 ⇒ Erster Mikroprozessor (Intel 4004, TI TMS1802NC)
- 2002 ⇒ Höchstintegration bei Speichern und Prozessoren (Pentium 4, 0,13 µm, 4,0 GHz, 42 Mio. Transistoren)
  - ⇒ Höchstleistungen bei Leistungshalbleitern (IGBT bis 6500 V, 2400 A, Thyristor 8000 V, 3500 A)

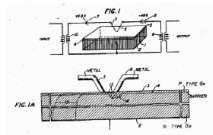
## Entwicklung der Halbleiterelektronik



Erster Transistor (1947)



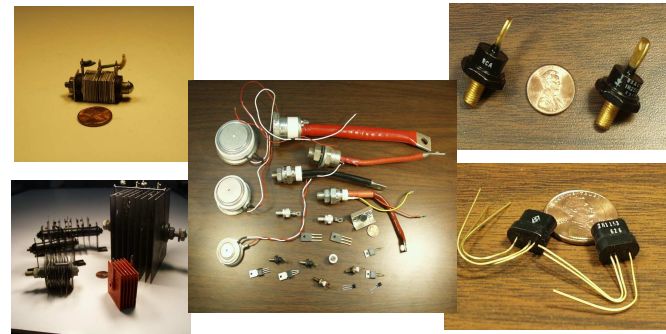
Bardeen, Brattain, Shockley



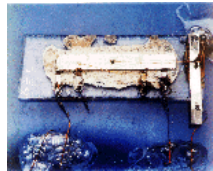
Patentskizze

1948: Patent für den Transistor-Effekt und Transistor-Verstärker  
 John Bardeen, Walter H. Brattain, William B. Shockley  
 (Bell Telephone Laboratories, New York)

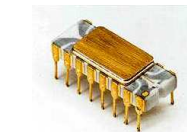
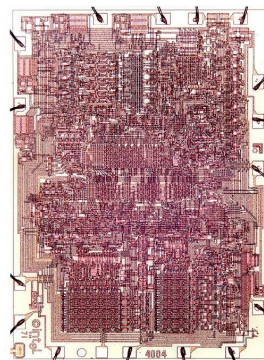
## Entwicklung der Halbleiterelektronik



## Entwicklung der Halbleiterelektronik

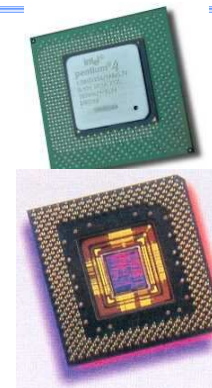


Erste integrierte Schaltung (1958)



Erster Mikroprozessor Intel 4004 (1971)

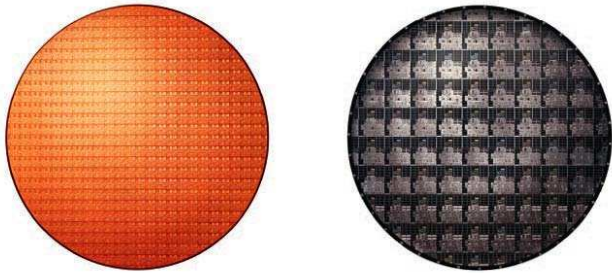
## Entwicklung der Halbleiterelektronik



Microprocessor	Year of Introduction	Transistors
4004	1971	2,300
8008	1972	2,500
8080	1974	4,500
8086	1978	29,000
Intel286	1982	134,000
Intel386™ processor	1985	275,000
Intel486™ processor	1989	1,200,000
Intel® Pentium® processor	1993	3,100,000
Intel® Pentium® II processor	1997	7,500,000
Intel® Pentium® III processor	1999	9,500,000
Intel® Pentium® 4 processor	2000	42,000,000
Intel® Itanium® processor	2001	25,000,000
Intel® Itanium® 2 processor	2003	220,000,000
Intel® Itanium® 2 processor (9MB cache)	2004	592,000,000

Copyright © 2005 Intel Corporation.

## Entwicklung der Halbleiterelektronik



Intel® Pentium® 4 Processor

Intel® Itanium® Processor

## Halbleiterelektronik

- Entwicklung der Halbleiterelektronik
- Halbleiterphysik
- Halbleiter Herstellung (Si)

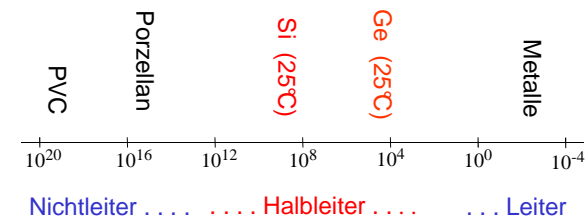
## Halbleiterphysik

Lernziel:

- Antworten auf folgende und ähnliche Fragen geben zu können:
  - Was versteht man unter einem Halbleiter?
  - Wie ist ein Halbleiter aufgebaut?
  - Wie lassen sich Halbleiter in das System von Leitern und Nichtleitern einordnen?
  - Welche Leitungsmechanismen sind im Halbleiter wirksam?

## Einordnung der Halbleiter

Spezifischer Widerstand unterschiedlicher Materialien in  $\Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$



## Stromfluß

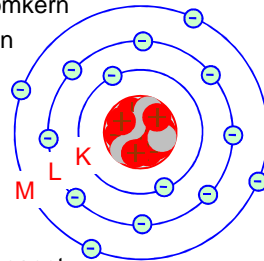
- Was versteht man unter Stromfluß?
  - Gerichtete Bewegung von Ladungsträgern
- Welche Ladungsträger gibt es?
  - Elektronen (insbesondere in Festkörpern) (-)
  - Ionen (in Elektrolyten) (+) oder (-)
  - ❖ Löcher (nur in Halbleitern) (+)
- Wie sind die Atome aufgebaut?

## Aufbau von Atomen

- Die Atome sind aufgebaut von:
  - Protonen (positiv aufgeladen);
  - Elektronen (negativ aufgeladen);
  - Neutronen (elektrisch neutral).
- Das Atom ist neutral aufgeladen, weil:
  - Die Zahl der Protonen und Elektronen ist gleich;
  - Die Ladungen eines Elektrons und eines Protons kompensieren sich gegenseitig.

## Aufbau von Atomen (Si)

- 14 Protonen + 14 Neutronen bilden den Atomkern
- 14 Elektronen umkreisen den Atomkern
  - Es sind nur bestimmte Bahnradien möglich
  - Man spricht von Elektronenschalen
- Die Schalen werden von innen nach außen mit K, L, M usw. benannt



## Belegung der Elektronenschalen

- Die maximale Zahl von Elektronen auf einer Schale beträgt

$$N_{\max} = 2 \times n^2$$

(aber maximal 8 auf der äußersten Schale)

Schale	K	L	M	N	O	P	Q	
n	1	2	3	4	5	6	7	
$N_{\max}$	2	8	18	32	(50)	(72)	(98)	innere Schalen
$N_{\max}$	2	8	8	8	8	8	8	äußerste Schale (Edelgaskonfiguration)

## Bindung der Atome

- Sie versuchen die maximal mögliche Zahl von Elektronen auf der äußeren Elektronenschale zu erreichen.
- Dies läßt sich erreichen durch:
  - Aufnahme von fremden Elektronen in die Valenzschale – wenn nur wenige Elektronen zur Edelgaskonfiguration fehlen
  - Abgabe aller Valenzelektronen der Schale – wenn nur wenige Valenzelektronen vorhanden sind
  - Gemeinsame Nutzung von Elektronenpaaren durch je zwei Atome

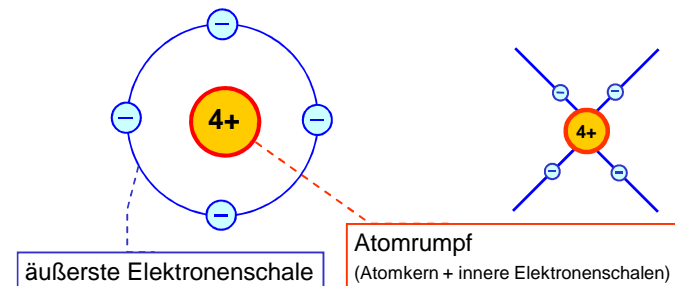
## Bindung der Atome bei Metalle

- Bei der Metallbindung trennen sich die Valenzelektronen von ihren Atomen
- Die ursprünglichen Valenzelektronen sind zwischen den Atomen frei beweglich (sog. Elektronengas)
- in sehr gute elektrische Leiter ist die Dichte freier Elektronen mindestens  $5 \times 10^{22} / \text{cm}^3$

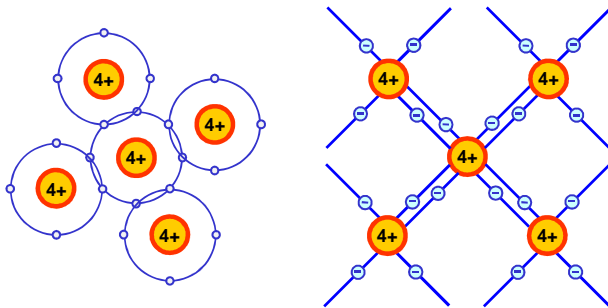
## Bindung der Atome bei Halbleiter

- Die Bindung zweier Atome geschieht durch ein gemeinsames Elektronenpaar
- Elektronenpaarbindung
- Das Elektronenpaar besteht aus je einem Elektron der beiden Atome
- Die Elektronen eines Elektronenpaares sind an die Atome gebunden

## Vereinfachte Darstellung eines Halbleiteratoms



## Elektronenpaarbindungen



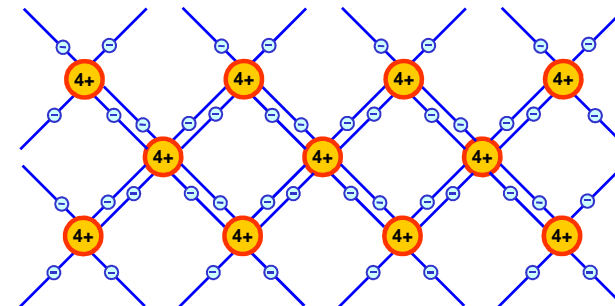
## Leitungsmechanismen

- In einem Halbleiter lassen sich 2 grundsätzlich unterschiedliche Leitungsmechanismen unterscheiden
- > **Eigenleitung** - Stromleitung im reinen (nicht verunreinigten) Halbleiter
- > **Störstellenleitung** - Stromleitung im dotierten bzw. gezielt "verunreinigten" Halbleiter

## Eigenleitung von Halbleitern

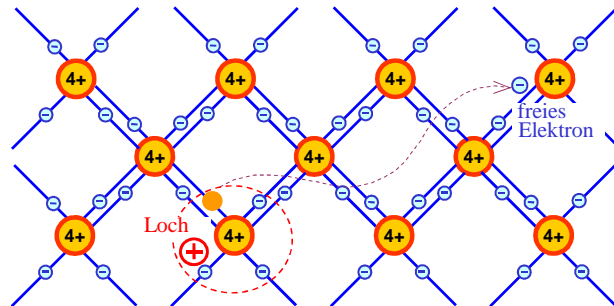
- Unter Eigenleitung versteht man die Stromleitung im reinen Halbleiter.
- Die Eigenleitung ist sehr stark temperaturabhängig:
- bei  $T = 0\text{ K}$  ⇒ Alle Valenzelektronen sind in Paarbindungen festgehalten; ⇒ Es sind keine freien Elektronen vorhanden
- bei  $T > 0\text{ K}$  ⇒ Energiezufuhr zu den Atomen und ihren (Valenz-)Elektronen;
- ⇒ Energierichste Elektronen brechen aus den Elektronenpaarbindungen aus

## Eigenleitung von Halbleitern



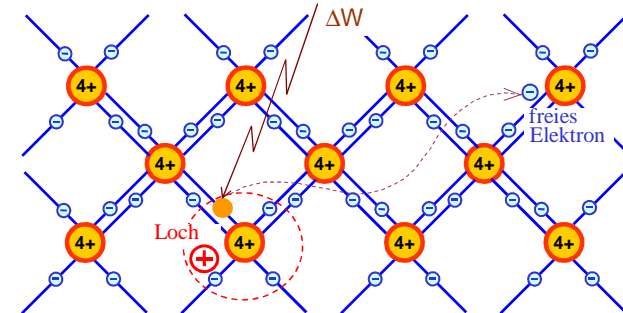
Der Halbleiter verhält sich wie ein Isolator bei  $T = 0\text{ K}$

## Ladungsträger-Generation



Die Konzentration  $n$  der freien Elektronen ist gleich der Konzentration  $p$  der Löcher ( $n = p$ )

## Ladungsträger-Generation



Die Ionisierungsenergie bei Si beträgt ca.  $\Delta W \approx 1,1 \text{ eV}$

## Rekombination

- Die Rekombination ist das Gegenstück zur Paarbildung
- Auslöschung eines freien Elektrons und eines Loches
- Die Konzentration der Löcher und der Elektronen ist temperaturabhängig
- $n = p = n_i = f(T)$  (im thermischen Gleichgewicht),
- $n_i$  ist die Ladungsträgerkonzentration des reinen Halbleiters (Intrinsic-Zahl)
- Für Si  $n_i = 1,5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$  bei  $T = 300 \text{ K}$
- Die Intrinsic-Dichte verdoppelt sich etwa bei einer Temperaturerhöhung um  $\Delta T = 10 \text{ K}$

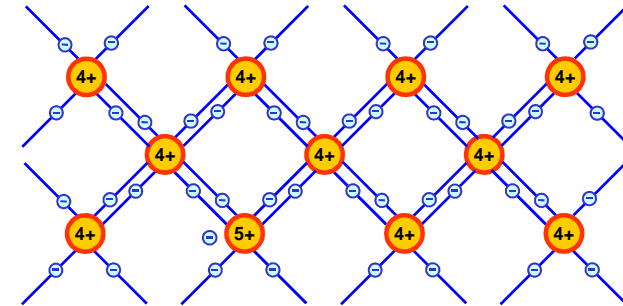
## Störstellenleitung von Halbleitern

- Die Leitfähigkeit eines Halbleiters lässt sich deutlich erhöhen durch Einbau von Fremdatomen (Dotieren) in den Halbleiterkristall
- Zum Dotieren benutzt man 3- oder 5-wertige Atome, d.h. jedes Atom gewährleistet einen Ladungsträger (ein Elektron oder ein Loch)
- 5-wertige Elemente: P, As, Sb
- 3-wertige Elemente: B, Al, In
- Dotiert wird mit relativ geringen Mengen von Fremdatomen
- (Fremdatome : Halbleiteratome =  $1:1000$  до  $1:10^{10}$ )

## Methoden des Dotieren

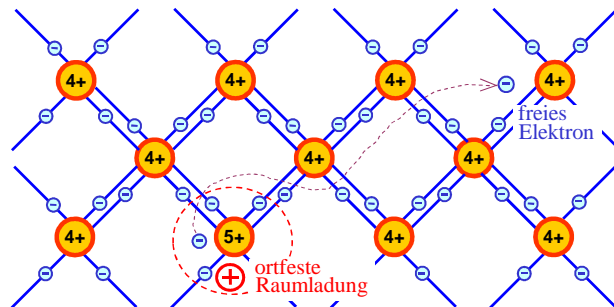
- Legierungstechnik
- Diffusionstechnik (aus Gasphase)
- Epitaxialtechnik (Kristallwachstum aus Gasphase)
- Ionenimplantation

## Dotieren mit 5-wertigen Fremdatomen



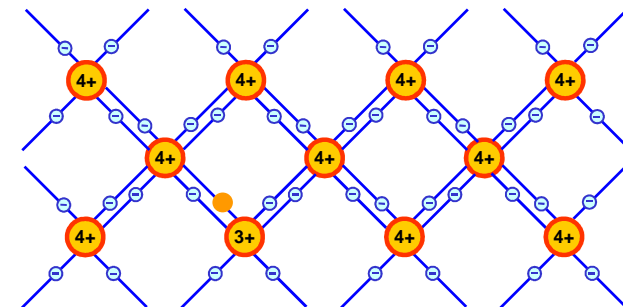
Im ersten Moment, oder bei niedriger Temperatur

## Ionisierung bei Energiezufuhr



n-dotierter Halbleiter (Die Ladungsträger sind die freien Elektronen)

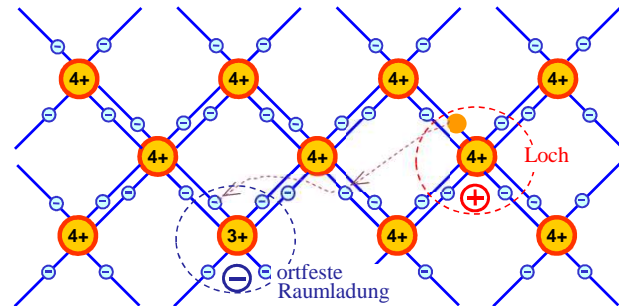
## Dotieren mit 3-wertigen Fremdatomen



Im ersten Moment, oder bei niedriger Temperatur



## Ionisierung bei Energiezufuhr



**p-dotierter Halbleiter** (Die Löcher, als Ladungsträger, bewegen sich wenn ein Valenzelektron den freien Platz besetzt)

## Dotierungskonzentration

- Die Konzentration freier Ladungsträger wird durch die Konzentration der Fremdatome ( $n_A, n_D$ ) und durch die Eigenleitung ( $n_i$ ) bestimmt
- Wählt man die Dotierungskonzentration deutlich größer als der Eigenleitung, so bestimmt die Dotierung die Konzentration der freien Ladungsträger
- Die Konzentrationen von freien Elektronen und von Löchern sind im dotierten Halbleiter nicht gleich

## Dotierungskonzentration

- Die in der Mehrzahl vorhandene Ladungsträgerart nennt man „Majoritätsträger“
- Die in der Minderzahl vorhandene Ladungsträgerart nennt man „Minoritätsträger“
- Die Konzentration der Majoritätsträger beeinflusst die Konzentration der Minoritätsträger
- Vergrößert man die Konzentration der Majoritätsträger erhöht sich die Rekombinationswahrscheinlichkeit, und die Konzentration der Minoritätsträger reduziert sich

## Dotierungskonzentration

- Im n-leitenden Halbleiter ist die Konzentrationen freier Elektronen ( $n_n$ ) größer als die Konzentration von Löchern ( $p_n$ )
  - $n_n = n_D + n_i \approx n_D = a \cdot n_i$ ;  $p_n = n_i/a$ , d.h.  $n_n \cdot p_n = n_i^2$
- Im p-leitenden Halbleiter ist die Konzentrationen von Löchern ( $p_p$ ) größer als die Konzentration freier Elektronen ( $n_p$ )
  - $p_p = n_A + n_i \approx n_A = a \cdot n_i$ ;  $n_p = n_i/a$ , d.h.  $n_p \cdot p_p = n_i^2$

## Leitfähigkeit eines Halbleiters

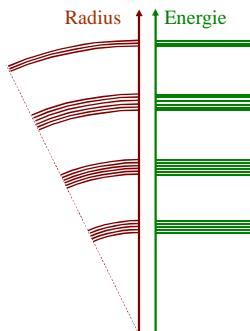
- Die spezifische Leitfähigkeit  $\sigma$  wird als Quotient aus der Stromdichte und der elektrischen Feldstärke  $\sigma = J/E$  berechnet. Mit den Größen:
  - Elementarladung –  $e$ ; Ladung –  $Q$ ; Elektronenzahl–  $N$ ;
  - Stromdichte  $J = I/A$ ; Stromstärke  $I = dQ/dt = e \cdot dN/dt$ ;
  - Elektronendichte  $n = dN/dV$ ; Volumen  $dV = A \cdot dx$ ;
  - Geschwindigkeit  $v = dx/dt$ ; Beweglichkeit  $\mu = v/E$ ;
 wird daraus:  $\sigma = e \cdot n \cdot \mu$
- Für einen Halbleiter mit Elektronen und Löchern ergibt sich :  
 $\sigma = e \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$

## Energiebetrachtung

- Die Bahnradien der Elektronen sind ein Maß für deren Energie
- Aus den Elektronenbahnen kann damit eine grafische Darstellung der Elektronenenergie abgeleitet werden

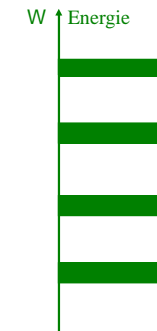
## Energie-Term-Schema

- Man überträgt die kreisförmigen Elektronenbahnen eines einzelnen Atomes in gerade Linien in einem Energiediagramm
- Man erhält das sog. Energie-Term-Schema
- Jeder Elektronenbahn entspricht eine einzelne Linie im Energiediagramm (ein einzelner Energiterm)



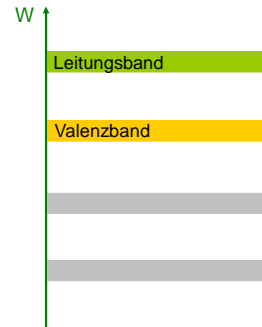
## Energiebänder-Schema

- Die Elektronen vieler Atome, wie in einem Kristall, beeinflussen sich gegenseitig
- Die einzelnen Energiterme lassen sich nicht mehr unterscheiden  $\Rightarrow$  Die zahllosen einzelnen Energiterme gehen in Energiebänder über
- Energien zwischen den Energiebändern sind nicht möglich (**verbotene Bänder**)



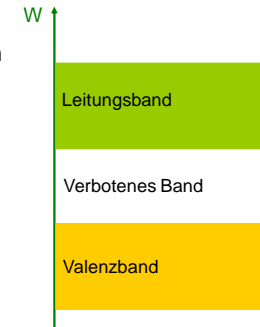
## Energiebänder-Schema

- Das Energieband der äußersten Elektronenschale wird **Valenzband** genannt
- Oberhalb des Valenzbandes befindet sich **das Leitungsband**
- Dieser Energiebereich wird von den Elektronen eingenommen, die sich von ihren Atomen getrennt haben (**den freien Elektronen**)



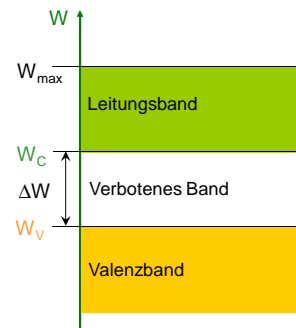
## Energiebänder-Modell

- Reaktionen mit anderen Atomen und elektrische Vorgänge werden nur durch Elektronen im Valenzband und im Leitungsband bestimmt
- Üblicherweise werden daher nur diese Energiebänder und das dazwischen liegende verbotene Band dargestellt



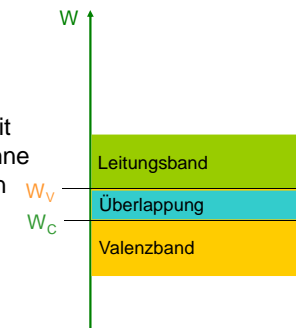
## Energiebänder-Modell

- $W_C - W_V = \Delta W$  ist die Ausdehnung des verbotenen Bandes
- Elektronen, die die Energie  $W_{max}$  überschreiten, können den Kristall verlassen



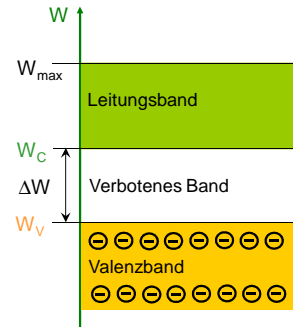
## Energiebänder-Modell von Metallen

- Bei Metallen überlappen sich Valenzband und Leitungsband
- Valenzelektronen können damit ins Leitungsband wechseln, ohne Energie aufnehmen zu müssen



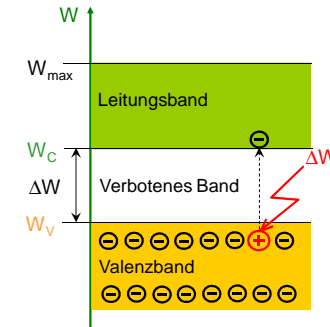
## Energiebänder-Modell von reinen Halbleitern

- Bei Halbleitern existiert ein verbotenes Band zwischen Valenzband und Leitungsband
- Bei Ge beträgt der Bandabstand:  $\Delta W \approx 0,7 \text{ eV}$
- Bei Si beträgt der Bandabstand:  $\Delta W \approx 1,1 \text{ eV}$
- Bei  $T = 0 \text{ K}$  halten sich alle Valenzelektronen im Valenzband auf
- Der Halbleiter ist ein Isolator



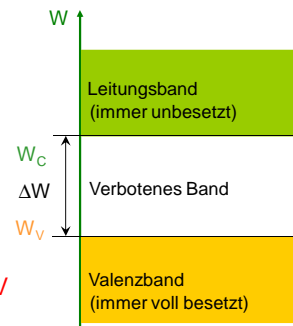
## Energiebänder-Modell von reinen Halbleitern

- Bei  $T > 0 \text{ K}$  nehmen die Elektronen Energie auf
- Beträgt die Energieaufnahme bei einem Elektron  $\geq \Delta W$ , so wird es ins Leitungsband angehoben
- Im Valenzband bleibt ein nicht besetzter Energieterm zurück, ein Loch
- Paarbildung



## Energiebänder-Modell von Nichtleitern

- Es ist nicht möglich Valenzelektronen eine Energie von mehr als  $2,5 \text{ eV}$  zuzuführen
- Materialien mit einem Bandabstand von  $\Delta W \geq 2,5 \text{ eV}$  sind daher Nichtleiter (Isolatoren)
- Beispiel: bei Diamant  $\Delta W \approx 7 \text{ eV}$



## Halbleiterelektronik

- Entwicklung der Halbleiterelektronik
- Halbleiterphysik
- Halbleiter Herstellung (Si)

## Halbleiter Herstellung



## Halbleiter Herstellung (Si)



□ Ausgangsstoff: Quarz, Sand =  
Siliziumoxyd ( $\text{SiO}_2$ )

□ Metallisches  
Germanium (Ge)

## Halbleiter Herstellung (Si)

- Vom Sand (Quarz), der vorwiegend  $\text{SiO}_2$  ist
- Polykristallines Silizium (Polysilicium)
  - Solarmodule (Wirkungsgrad für die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom ~ 14%, aber viel billiger)
  - Monokristallines Einkristall-Silizium
- Einkristall-Silizium
  - Bauelemente (Dioden, Transistoren...)
  - Solarmodule (Wirkungsgrad ~16%)

## Halbleiter Herstellung (Si)



Polysiliciumbrocken, Si-Einkristal, polierte Scheiben,  
Scheiben in einer Verpackungshorde, Bauelemente

## Halbleiter Herstellung (Si)

- Hochkomplizierter Fertigungsvorgang
- Zusammenarbeit von
  - Physik
  - Chemie
  - Elektrotechnik
  - Feinmechanik
- Nur wenige Hersteller beherrschen das Herstellungsverfahren

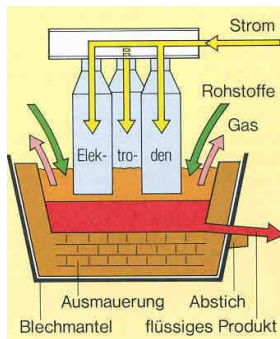
## Polykristallines Si (1. Stufe)

- Quarzsand wird bei 2100 °C geschmolzen
- Nach Reduktion mit Kohlenstoff
  - Rohsilizium (Si)
- Durch elektrothermische Reduktion
  - im Lichtbogen, zwischen den Elektroden und die Schmelze



- Die Reinheit des Si ist ca. 98 % (Fremdbestandteile Fe, Al, Ca, Ti, C)
- Für die Bedürfnisse der Mikroelektronik ist es aber viel zu verschmutzt

## Reduktion von SiO<sub>2</sub>

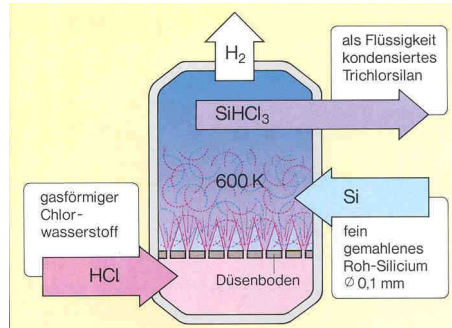


## Polykristallines Si (2. Stufe)

- Rohsilizium wird fein gemahlen ⇒ ca. Ø 0,1 mm
- Die Reinigung geschieht durch Chlorwasserstoff
  - Trichlorsilan
- Die Flüssigkeit wird destilliert
  - Abtrennung von begleitenden anderen Silanverbindungen
  - reines Trichlorsilan (flüssig)



## Herrstellung von Trichlorsilan



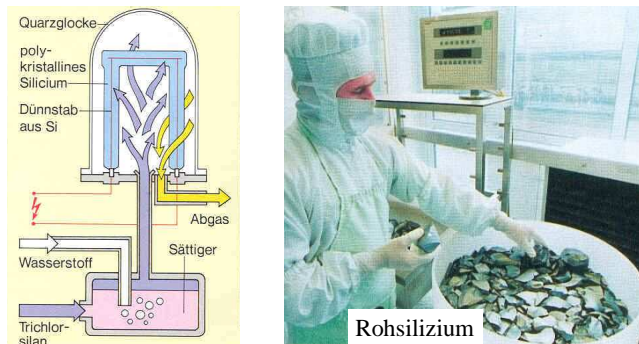
Bildung von Trichlorsilan (Wirbelschichtreaktor)

## Polykristallines Si (3. Stufe)

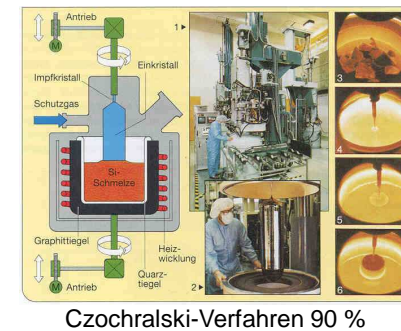
- Trichlorsilan (gasförmig) wird mit Wasserstoff behandelt
- Polykristallines Reinst-Si (Reinheit 99, 9999999 %)
- Abscheidung des Silicium erfolgt an dünnen, sehr reinen Si-Stäben
- Anwachsen zu Stäben von Ø 20 cm und 2 m Länge
- Silicium wird zerkleinert und fein gemahlen (Czochralski)



## Silicium-Abscheidungsreaktor

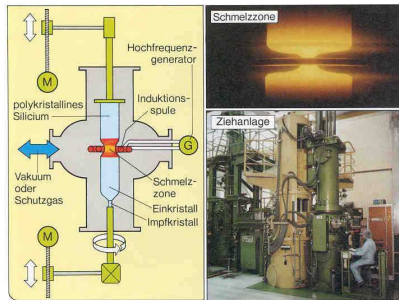


## Einkristall-Herstellung (Si)



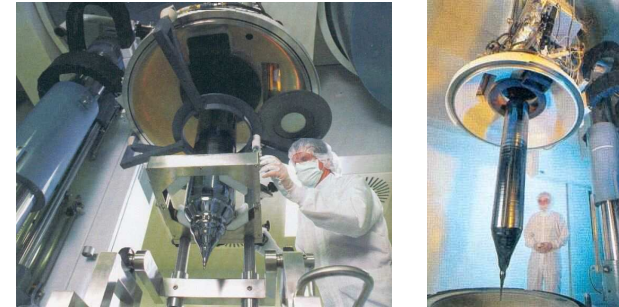


## Einkristall-Herstellung (Si)



Zonenziehen 10 %

## Einkristall-Herstellung (Si)

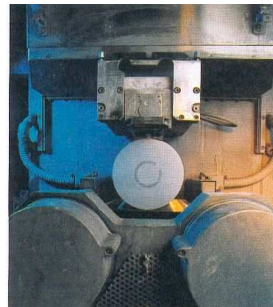


Siliziumrohling:  $\varnothing$  20 (30) cm und Länge bis 2 m

## Bearbeitung des Rohlings



Siliziumrohling wird auf Durchmesser geschliffen



... und mit Drahtsäge in Scheiben von ca. 0,5 mm Dicke geschnitten

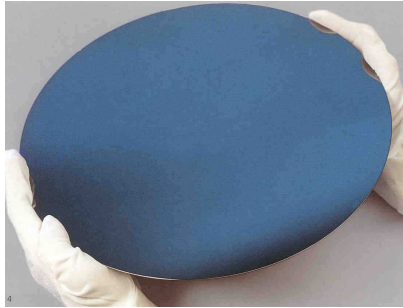
## Bearbeitung der Scheiben (Wafer)



polieren, läppen, feinschleifen und ätzen bis an der Oberfläche keine Kristallversetzungen mehr vorhanden sind

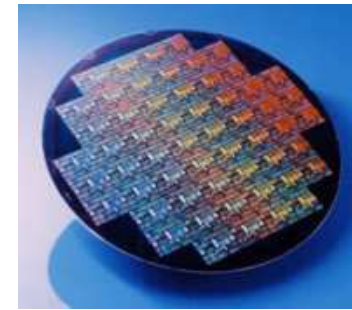


## Si-Wafer (300 mm)



Siltronic, 2001 r.

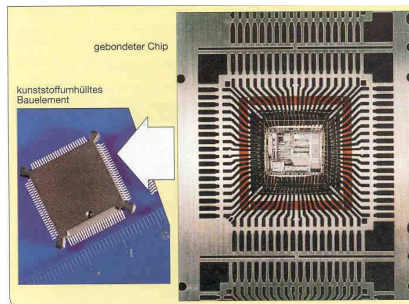
## Wafer mit integrierten Schaltungen



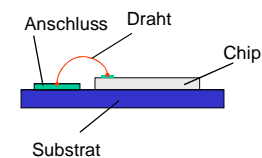
- Wafer werden zersägt
- Chips werden in Gehäusen montiert

## Verdrahtung / Umhüllung von Chips

1. Zentrieren der IC's (Chips)
2. Bonden (Bonding)
3. Kunststoffumhüllung

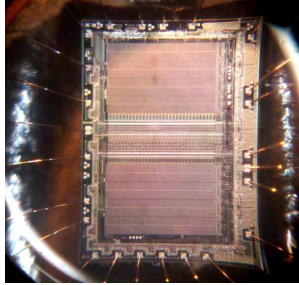


## Bonden



- Beim Bonden werden die Anschlüsse mit der Kontaktflächen der IC's durch haarfeinen Drähten verbunden
- Drahtbonden (Wire bonding)

## Bonden



Mit haarfeinen Golddrähten (ca. 30  $\mu\text{m}$ ) gebondeter integrierter Schaltkreis (EPROM in Keramikgehäuse mit Glasfenster)