

2 MOS-Transistortheorie

In einer integrierten Schaltung sind winzige Schaltungselemente in einem Chip aus Si-Halbleitermaterial untergebracht und verbunden. Zum Verständnis der IC-Technologie, des Entwicklungsprozesses und der Eigenschaften von IC's sind daher im folgenden Grundlagen zu den Halbleitereigenschaften und den Aufbauelementen der Schaltungen, den Widerständen, den Kondensatoren, den Dioden (Ventile), den Transistoren (Schalter und Verstärker) und der Verbindungstechnik zusammengestellt.

2.1 Halbleitereigenschaften

Integrierte Schaltungen werden fast ausnahmslos auf der Basis von einkristallinem Silizium (Si) hergestellt, einem Halbleitermaterial, das aus Quarzsand (SiO_2) gewonnen werden kann. Halbleiter nennt man das Material deswegen, weil der elektrische Leitungsmechanismus und die Leitfähigkeit gezielt durch technologie-spezifische Prozesse (Dotierung) eingestellt werden können und die einstellbare Leitfähigkeit den Bereich zwischen den Metallen und den Isolatoren überstreicht.

Voraussetzung für die technische Beherrschung und die Nutzbarmachung der Halbleitereigenschaften war die Entwicklung und das Verständnis der Halbleiterphysik und der notwendigen Chemie.

Die makroskopischen Eigenschaften lassen sich demnach aus den Eigenschaften der mikroskopischen, nicht sichtbaren atomaren Bausteine der Materie ableiten.

Orts- und Energiemodell

Silizium ist ein Element, das in die IV te Hauptgruppe des periodischen Systems der Elemente eingeordnet wird. Es besitzt somit in der äußersten Elektronenhülle vier 3d-Elektronen.

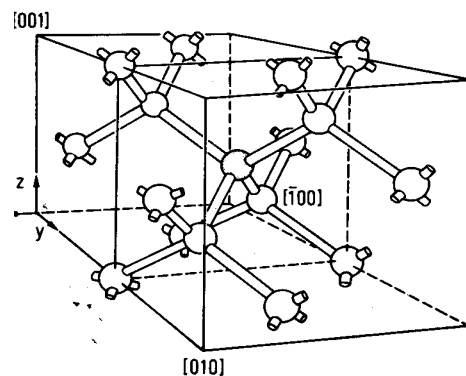
Ausschnitt aus dem Periodischen System der Elemente (PSE)

Gruppe	III	IV	V	VI
Periode 2	B	C	N	O
3	Al	Si	P	
4	Ga	Ge	As	
5	In		Sb	

Aus der Atomphysik und Chemie ist bekannt, dass für Verbindungen zwischen zwei oder mehreren Atomen die äußerste Elektronenhülle als Berührungsebene zwischen den Atomen eine wichtige Rolle spielt. Dabei ist der Zustand, in dem die äußerste Schale mit 8 Elektronen besetzt ist, energetisch besonders günstig und somit treibende Kraft für den Verbindungsaufbau (sog. abgeschlossene Schale). Im Siliziumkristall ist demnach jedes Si-Atom durch vier kovalente (Elektronenpaar-) Bindungen mit seinen nächsten Nachbarn verbunden. (kovalente Bindung = unpolare, gerichtete Bindung durch Elektronenpaar). Das Si-Kristallgitter ist so aufgebaut, dass die nächsten Nachbarn jedes Si-Atoms auf den Ecken einer Tetraeder Pyramide sitzen (Bild).

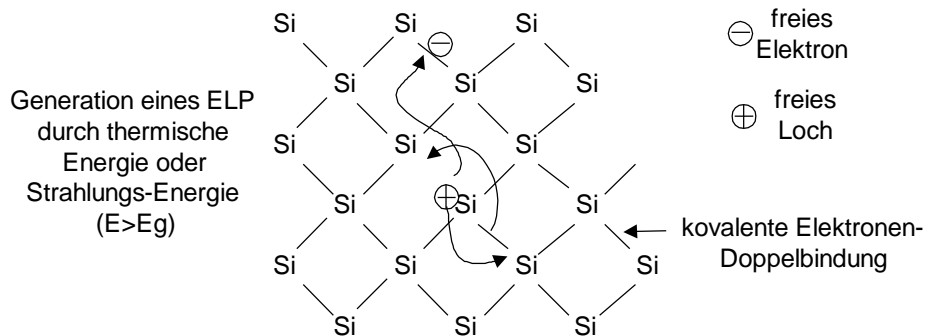
Der Abstand zwischen zwei Si- Atomen liegt in der Größenordnung von Angström Einheiten ($A = 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$): ein Kubikzentimeter des Siliziumkristalls enthält die unvorstellbar große Anzahl von 10^{22} Si-Atomen ($10^{22} / \text{cm}^{-3}$) !

Um den **Leitungsmechanismus** im Kristall zu veranschaulichen wird anstelle der 3-dimesionalen



Darstellung des Kristallgitters eine schematische 2-dimensionale Darstellung verwendet, in welche die wesentlichen Eigenschaften des Bindungsmechanismus übernommen werden. Die durch das Elektronenpaar vermittelte Doppelbindung wird durch einen Strich gekennzeichnet.

Elektrische Leitfähigkeit entsteht aufgrund der Wärmebewegung (Schwingungen der Atome), die zu einem gelegentlichen Aufbrechen eines geringen Teils der Bindungen führt. In Silizium bei 300 K ist dies eine unter 10^{12} Bindungen. Dadurch werden pro cm^3 ungefähr 10^{10} **Elektron-Loch Paare (ELP)** erzeugt (**Generation von ELPen**). Ein Elektron wird dabei aus der Bindung heraus gelöst. Es wird frei beweglich und kann durch den Kristall diffundieren. Weiterhin wird die elektrisch neutrale Stelle, an der die Bindung aufgebrochen ist, durch den Weggang des Elektrons aufgrund der positiven Kernladung nach außen hin positiv geladen. Dieser positiv geladene Zustand (= offene Bindung) kann ein Bindungselektron aus einer Nachbarbindung herüberziehen, wodurch die Bindung wieder geschlossen wird, aber dafür die Nachbarbindung geöffnet wird. Auf diese Weise kann sich eine positiv geladene Lücke (sog. Loch) ebenfalls frei durch den Kristall bewegen.



Durch die Wärmebewegung entstehen also in gleicher Anzahl frei bewegliche positive und negative Ladungsträger. In einem von außen angelegten elektrischen Feld (Spannungsquelle) führen diese Ladungsträger zu einem elektrischen Stromfluß (\rightarrow elektrische Leitfähigkeit).

Trifft ein freies Elektron auf ein Loch, so wird die offene Bindung wieder geschlossen und die aus der Bewegung stammende Energie als Schwingungsenergie an das Gitter abgegeben (sog. **nichtstrahlende Rekombination**).

Im thermischen Gleichgewicht halten sich die Zahl der durch Generation erzeugten ELP und die Zahl der durch Rekombination wieder verloren gehenden ELP die Waage, so dass bei einer bestimmten Wärmebewegung eine allein von der Temperatur abhängige Zahl von freien ELP im Kristall vorliegt. Bei Erwärmung des Kristalls wird die Schwingungsenergie erhöht und damit nimmt auch die Zahl der ELPen und die Leitfähigkeit zu.

Neben der **thermischen Generation** von ELPen gibt es auch noch die **Generation durch Strahlung**. Für die Wechselwirkung zwischen den Bindungselektronen und der Strahlung spielen die sogenannten **Photonen** eine Rolle. Dies sind die kleinsten Einheiten der elektromagnetischen Strahlung, ähnlich wie die Elektronen die kleinste Einheit der elektrischen Ladung sind. Im atomaren Bereich hat elektromagnetische Strahlung sowohl Wellen- wie auch Teilchencharakter. Im Gegensatz zu Elektronen haben aber die Photonen keine Ruhemasse, sie bewegen sich innerhalb eines Mediums mit konstanter Geschwindigkeit – der Lichtgeschwindigkeit c – und können folglich nicht gespeichert werden. Jedem Photon oder Quant einer Strahlung der Frequenz f und der Wellenlänge λ ist über die Planck'sche Beziehung eine Energie zugeordnet. (h = Planck'sches Wirkungsquantum)

$$W = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad W / eV = \frac{1240}{\lambda / nm}$$

Fällt nun auf den Si- Kristall elektromagnetische Strahlung, deren Energie ausreicht um Bindungen aufzubrechen, $W_{\text{photon}} > W_{\text{Bindung}}$, so werden ELPen erzeugt und somit die elektrische Leitfähigkeit des Kristalls erhöht. Für Silizium ist diese Bedingung bereits für Strahlung aus dem sichtbaren Bereich mit Wellenlängen von $\lambda < 800 \text{ nm}$ erfüllt. Licht wird also von Silizium absorbiert. Ein Teil des Lichtes wird andererseits wegen der elektrischen Leitfähigkeit und der Materialeigenschaften ($\epsilon_r = 11$, $n = \sqrt{\epsilon_r}$) $r = (n-1)^2 / (n+1)^2$) reflektiert. Ein Siliziumkristall ist daher optisch undurchsichtig und besitzt einen grauen metallischen Glanz.



Neben der schematischen Darstellung der Elektronen im 2-dimensionalen Ortsraum des Halbleiters ist auch eine Darstellung der Energieverhältnisse üblich und hilfreich.

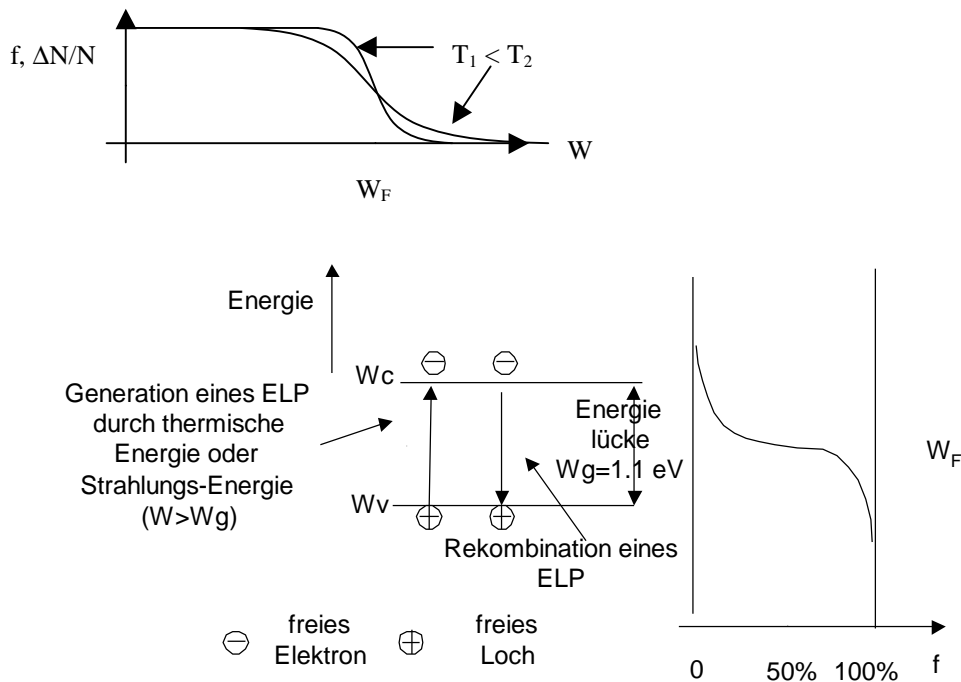
Im Halbleiterkristall werden die Elektronen ähnlich wie bei Einzelatomen auf Energieniveaus verteilt. Wegen der großen Anzahl der Elektronen liegen die Energieniveaus aber beliebig dicht. Die Rumpfelektronen und die Bindungselektronen besetzen die Energien im sog. Valenzband. Werden Bindungen aufgebrochen, so entstehen freie Elektronen und Löcher. Die Energieniveaus der freien Elektronen liegen im sogenannten Leitfähigkeitsband, das um den Energiebetrag, der zum Aufbrechen der Bindungen erforderlich ist, über dem Valenzband liegt. Dieser sog. Bandabstand hat bei Silizium den Wert $W_g = 1,1 \text{ eV}$. Die Energiedifferenz zwischen freien Elektronen und Löchern ist also mindestens gleich dem Bandabstand. Die Energieniveaus liegen an den nicht mit Elektronen besetzten Stellen im Valenzband.

Für die freien Elektronen im Leitungsband gibt es eine Zustandsdichtefunktion, $N(W)$, $W = \text{Energie}$, die mit der Wurzel aus dem Abstand der Energie zur Bandkante zunimmt.

$$N(W) \propto \sqrt{W - W_c}$$

Entsprechendes gilt für die Löcher.

Die freien Elektronen besitzen thermische Bewegungsenergie und tauschen aufgrund von Stößen Energie aus. Es ergibt sich eine Energie-Verteilung, bei der die Häufigkeit für niedrige Energien am größten ist und die Häufigkeit mit zunehmender Energie abnimmt (Fermi-Energieverteilung): entartetes Elektronengas. Mit zunehmender Temperatur gibt es mehr Elektronen mit höherer Energie (siehe Abb.) Die Energie, bei der die Wahrscheinlichkeit den Wert 50 % erreicht, wird als Fermienergie W_F bezeichnet.



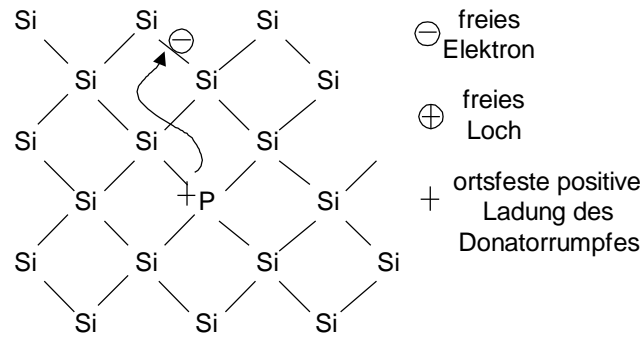
Dotierung :

Bringt man in das reine Si-Gitter (i-Si : intrinsic) Fremdatome aus der III- ten bzw. der V- ten Hauptgruppe des PSE ein, so erhält man p- bzw. n- dotiertes Silizium. Durch die Dotierung wird die Leitfähigkeit gezielt verändert.

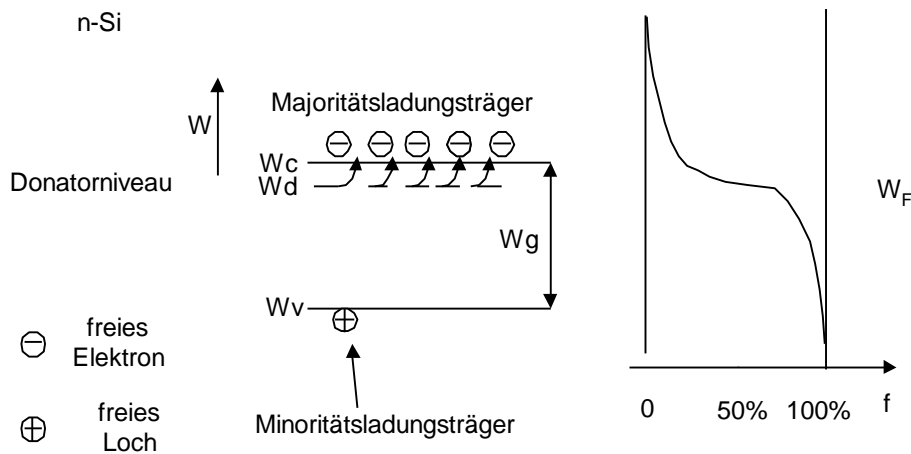
n-Dotierung: durch Donatoren wie P, As , n-Typ, n-Si oder Si:P, Si:As

p-Dotierung: durch Akzeptoren wie B, Al , p-Typ, p-Si oder Si:B, Si:Al

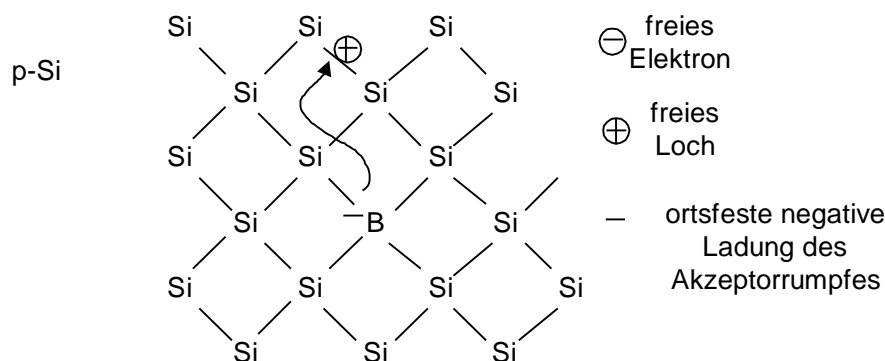


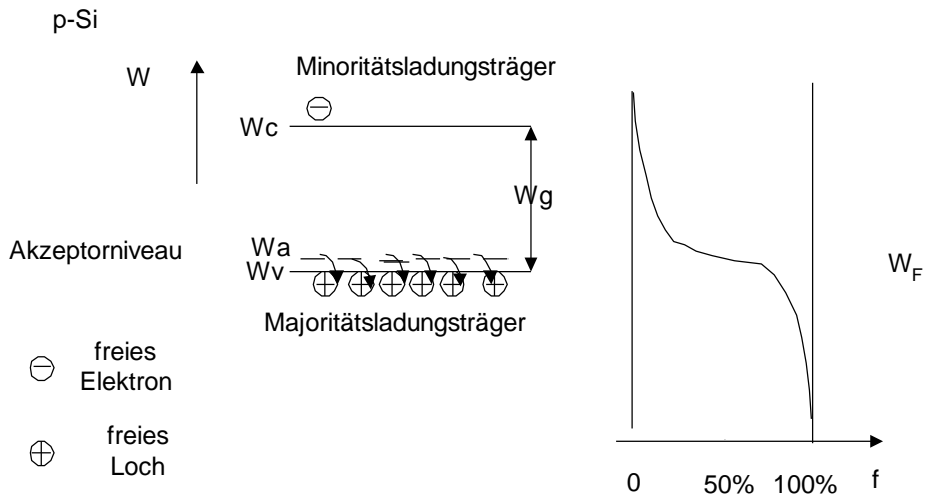


Beim Einbau eines fünfwertigen Atoms in das Si-Gitter werden von den fünf Außenelektronen des Fremdatoms nur vier benötigt um die kovalenten Bindungen im Gitter zu bilden. Das fünfte Elektron ist deswegen nur sehr schwach an das Fremdatom gebunden und wird aufgrund thermischer Energie abgelöst (dissoziiert) und ist frei beweglich. Am Ort des Fremdatoms verbleibt eine ortsfeste positive Überschussladung. Wird z.B. nur jedes 10^6 te Siliziumatom durch ein Fremdatom ersetzt, so steigt die Zahl der freien Elektronen um das 10^6 fache gegenüber der im i-Si (in i-Si ist jede 10^{12} te Bindung aufgebrochen). Im n-Si sind die Elektronen sog. Majoritätsladungsträger. Die wenigen Löcher werden Minoritätsladungsträger genannt. Ihre Zahl nimmt gegenüber der Konzentration im i-Si mit zunehmender Konz. der Fremdatome N_D ab, da die Rekombinationsrate mit N_D bzw. der Zahl der freien Elektronen zunimmt.



Entsprechend sind die Verhältnisse im p-Si.





Quantitatives zur Leitfähigkeit:

v_n = Driftgeschwindigkeit der Elektronen = $m_n E$

v_p = Driftgeschwindigkeit der Löcher = $m_p E$

m_n , m_p = Beweglichkeit der Elektronen bzw. Löcher

n , p = Konzentration der Elektronen bzw. Löcher (in Zahl / cm^3)

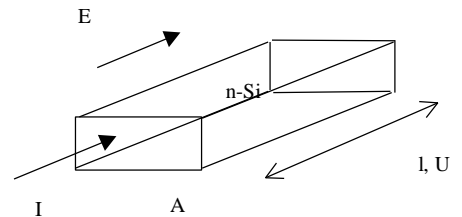
n_i = intrinsische Konz der Elektronen und Löcher = $1,5 \cdot 10^{10} cm^{-3}$ bei R.T.

N_d, N_a = Konzentration der Donatoren bzw. Akzeptoren (in Zahl / cm^3)

$e = 1,602 \cdot 10^{-19} Coul$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{(-e)n(-v_n)\Delta t A + epv_p\Delta t A}{\Delta t} = e(nm_n + pm_p)\frac{U}{l}A = \frac{U}{R}$$

$$R = \frac{1}{k} \frac{l}{A} \Rightarrow k = e(nm_n + pm_p) \quad \text{spez. Leitfähigkeit}$$



intrinsisch i-Si: (ohne Dotierung) $n = p = n_i$ und $n_i = n_{i0} \exp(-E_g / kT)$

n-Dotierung: $n \approx N_d$ und $p = \frac{n_i^2}{n} \ll n$

p-Dotierung: $p \approx N_a$ und $n = \frac{n_i^2}{p} \ll p$

Zu den Abbildungen auf der nächsten Seite

Abbildung 1 zeigt den spezifischen Widerstand von Silizium als Funktion der Dotierung

Abbildung 2 zeigt die Beweglichkeit von Elektronen und Löchern in Silizium als Funktion der Dotierungskonzentration bei Raumtemperatur

Abbildung 3 zeigt die Lebensdauer der Minoritätsladungsträger in Silizium als Funktion der Dotierungskonzentration

Zu bemerken ist, daß die Beweglichkeit für Elektronen etwa 3 mal größer ist als die für Löcher. Dies würde bedeuten, daß Bauelemente, bei denen die Leitung auf der Bewegung von Elektronen (in Form der Majoritätsladungsträger) basiert um den Faktor 3 mal schneller sein sollten als solche, bei denen die Löcher diese Funktion übernehmen. Im MOS-Transistor (MOSFET) sind die Verhältnisse jedoch leicht modifiziert, da hier Leitung in einem Kanal nahe der Oberfläche des Halbleiters erfolgt. Die Oberfläche ist dabei mit Oxid bedeckt. Wegen der Nähe zur unregelmäßigen Oberfläche mit ihren nicht vollständig abgesättigten Bindungen und Oberflächenzuständen nimmt hier die Beweglichkeit gegenüber dem Inneren (bulk) ab und der Unterschied zwischen Elektronen und Löcherbeweglichkeit besteht nur mehr in einem Faktor zwei. Aus diesem Grund sind bei sonst gleichem Aufbau n-Kanal MOSFETs (NMOS) etwa 2x schneller als p-MOSFETs (PMOS).

In der Abbildung 2 ist zu sehen, daß die Beweglichkeit von der Dotierungskonzentration abhängt.

Unter der Ladungsträgerlebensdauer versteht man die gemittelte Zeit, die zwischen der Bildung und der Rekombination eines freien Ladungsträgers verstreicht. (Siehe Abbildungen)



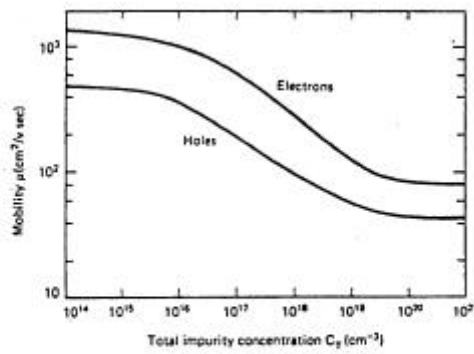
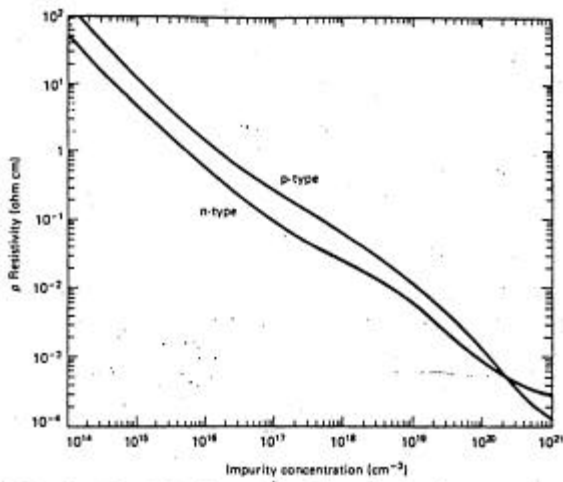


Figure 3-9. Mobility of electrons and holes for silicon at room temperature as a function of total impurity concentration. (Reprinted from *Proceedings of the IRE*, Vol. 46, pp. 1281-1300, 1958, with permission from I.E.E.E.)

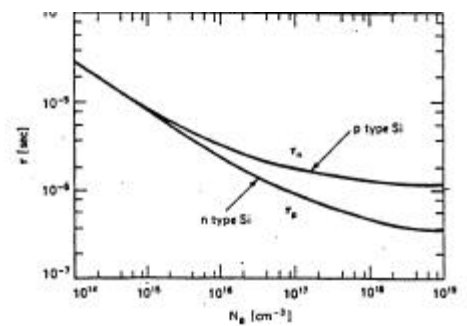


Figure 4-6. Minority carrier lifetime versus doping density for silicon at room temperature.



Fermiverteilung

Die nächsten Abbildungen aus [Paul] zeigen noch einmal das Bändermodell für den Halbleiter

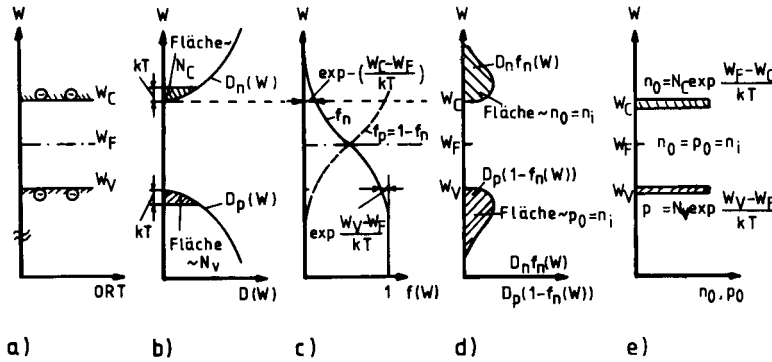


Bild 1.13 Bändermodell (a), Zustandsdichte (b), Fermi-Dirac-Verteilung (c), Energieverteilung der Trägerdichten (d), Trägerdichten mit Boltzmann-Näherung (e)

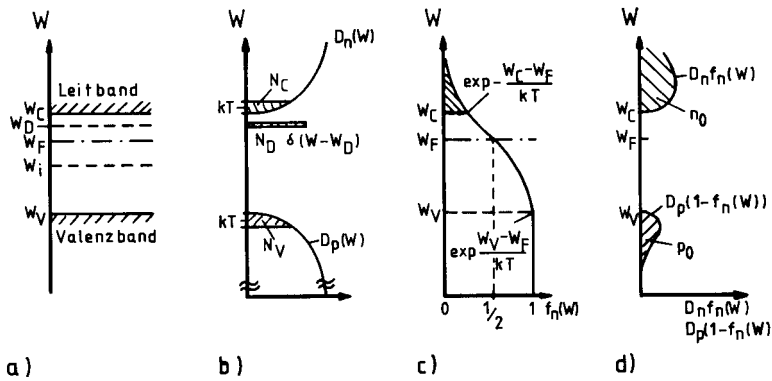


Bild 1.14 Bändermodell (a), Zustandsdichte (b), Fermi-Dirac-Verteilung (c), Energieverteilung der Trägerdichten beim n-Halbleiter (d)

Die Zustandsdichtefunktion der Elektronen $D_n(W)$ trägt dem Umstand Rechnung, daß für jedes Energieniveau nur eine begrenzte Zahl von Plätzen für Elektronen zur Verfügung stehen (entsprechend der möglichen Anzahl der (stehende) Elektronenwellen: Teilchen-Welle Dualismus der Elektronen).

Die sog. Fermische Verteilungsfunktion $f_n(W)$ gibt für eine bestimmte Energie das Verhältnis der Zahl der Elektronen, die sich in Zuständen mit einer Energie zwischen W und $W + dW$ befinden, zur Gesamtzahl der Elektronen an, oder anders ausgedrückt : $f_n(W)dW$ ist gleich die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Elektronenergie einen Wert zwischen W und $W+dW$ hat.

Da für jede Energie nur eine begrenzten Zahl von Niveaus zur Verfügung stehen und zuerst die tiefen Niveaus weitgehend aufgefüllt werden, ist diese Funktion für geringe Energien bis nahe an die Bandkante ungefähr Eins und nimmt dann erst ab (vgl. Shockley'sches Garagenmodell). Für die Löcher, die ja durch das Fehlen eines Bindungselektrons zustande kommen, gilt für $D_p(W)$ und $f_p(W)$ jeweils ein inverser Verlauf zu $D_n(W)$ und $f_n(W)$, nämlich $D_p(W) = -D_n(W_i - W)$ und $f_p(W) = 1 - f_n(W)$. Die Fermi-Energie oder das Fermi-niveau ist derjenige Energiewert, bei dem die Fermifunktion den Wert $1/2$ einnimmt: $f(W_F) = 1/2$. Die Fermifunktion ist symmetrisch zu W_F . Wenn die Temperatur steigt, dann gelangen immer mehr Elektronen in höhere Energieniveaus. Für die Fermifunktion bedeutet das, daß die Steigung von $f(W)$ bei W_F flacher wird und die Werte von $f(W)$ für Energien $W > W_F$ angehoben und für $W < W_F$ abgesenkt werden.



Es gilt:

i-Si : $W_F = W_i$,

n-Si : $W_F \ll W_c$,

p-Si : $W_F \gg W_v$,

Verunreinigungen mit anderen Atomen als den Dotieratomen

Dotierung oder Verunreinigung mit großen Atomen aus der VI Gruppe des PSE wie z.B. Sauerstoff (O) und Kohlenstoff (C) führen nicht zu einer kontrollierbaren Veränderung der Leitfähigkeit, sondern zu Gitterstörungen und sogenannten traps (Fallen) in der Mitte des verbotenen Bandes, an denen Ladungsträger rekombinieren. Es ergibt sich somit eine unkontrollierbare Verschlechterung der elektrischen Eigenschaften. Die für die Kontakttechnologie wichtigen Metalle Kupfer, Silber und Gold (Cu, Ag und Au) werden von kleinen zweiwertigen Atomen aufgebaut. Diese können bei erhöhter Temperatur ($>600\text{ °C}$) sehr leicht in das Si-Gitter hineindiffundieren und führen dann zu einer unkontrollierbaren Erhöhung der Leitfähigkeit, sowie zu einer Reduzierung der Trägerlebensdauer. Deswegen werden bei der Chiptechnologie die Metallisierungen am Ende der Prozeßkette durchgeführt, wobei keine Hochtemperaturprozesse folgen dürfen.

Andere Halbleiter

Für optoelektronische Bauelemente und sehr schnelle Schaltungen müssen auch andere Halbleitermaterialien als Silizium eingesetzt werden. Die dafür notwendige Technologie und Chemie ist jedoch meist wesentlich komplizierter und bei weitem nicht so weit entwickelt wie die Siliziumtechnologie, die zur Groß- und Basistechnologie der Mikroelektronik geworden ist.

Siehe auch Tabelle mit PSE und Tabelle 2.

Ge (Germanium)

Ebenfalls ein Element aus der IV ten Hauptgruppe des PSE. Seltenes Vorkommen. Grundlegende Arbeiten für Halbleiterbauelemente (Diode und Transistor) wurden zwischen 1940 und 1947 auf der Basis von Ge durchgeführt (Shockley, Bardain und Brattain bei Bell-Labs). Wegen des gegenüber Silizium geringeren Bandabstandes sind die elektrischen Eigenschaften stärker temperaturabhängig als bei Siliziumbauelementen. Hauptvorteil des Siliziums gegenüber Germanium ist jedoch, dass auf Silizium durch thermische Reaktion eine stabile natürliche Oxidschicht aufgewachsen werden kann, die günstige Voraussetzung für die Planartechnik bietet. Bei Ge ist dagegen das natürliche Oxid nicht stabil. Heute wird Ge wegen seines Bandabstandes für Detektoren in LWL –Übertragungsstecken bei $1,3\text{ }\mu\text{m}$ Wellenlänge eingesetzt.

GaAs (Galliumarsenid)

III-V –Verbindungshalbleiter mit ca. 6x höherer Elektronenbeweglichkeit wie in Si bietet die Möglichkeit zur Realisierung schneller Bauelemente. Wegen „direkter“ Bandstruktur auch strahlende Rekombination möglich. Bandabstand $W_G = 1,4\text{ eV}$. Kristallherstellung und Bearbeitung sowie die Technologie und Chemie des GaAs sind aufwendig und schwierig. Ein Problem ist z.B., daß es bei den für die Bauelementeherstellung notwendigen Prozeßtemperaturen zu einem Zersetzen des Materials kommen kann (Abdampfen von Arsen aus der Kristalloberfläche, Erosion der Oberfläche).

Anwendung: IR-Dioden zur Fernsteuerung, in Optokopplern, Lichtschranken. Laser in CD-Playern und CD-ROM Speichern von PCs.

Schnelle Verstärker für Laseransteuerung in hochratigen LWL-Übertragungsstecken bis 10 Gbit/s.

Schnelle Oszillatoren, Verstärker, analoge und digitale Schaltungen für HF- und militärische Anwendungen bis 20 GHz. (Integration bis 100 Bauelemente pro Schaltung)



Weitere binäre, ternäre und quaternäre Verbindungshalbleiter

GaP, InP Ausgangsmaterial (Substratmaterial) bei der Kristallherstellung für die unten genannten ternären und quaternären Halbleiter.

GaAs_{1-x}P_x für LED im Bereich grün bis rot

Ga_xAl_{1-x}As für Laser im nahen Infrarot ($\lambda = 0,8 \mu\text{m}$ bis $\lambda = 1,0 \mu\text{m}$)

(Ga_xIn_{1-x})(As_yP_{1-y}) für Laser- und Photodioden im zweiten und dritten Infrarot Fenster der Quarzglasfaser ($\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ und $\lambda = 1,6 \mu\text{m}$)

Important Properties of Germanium, Silicon, Gallium Arsenide, Silicon Dioxide, and Silicon Nitride at 300 °K.

Property	Ge	Si	GaAs	SiO ₂	Si ₃ N ₄
Atomic weight (or molecular)	72.6	28.09	144.63	60.08	140.28
Atoms per cm ³	4.42×10^{22}	5×10^{22}	2.21×10^{22}	2.3×10^{22}	1.28×10^{22}
Density (g/cm ³)	5.32	2.33	5.32	2.27	3.0
Energy gap (eV)	0.67	1.11	1.4	8.0	5.0
Intrinsic carrier concentration n_i (cm ⁻³)	2.4×10^{13}	1.45×10^{10}	9.6×10^6	—	—
Intrinsic mobilities (cm ² /V sec)					
electrons	3900	1350	8600	Insulator	Insulator
holes	1900	480	250		
Relative permittivity	16.3	11.7	12.0	3.9	6-9
Breakdown field (V/ μm)	8	30	35	600	500
Melting point (°C)	937	1450	1238	1700	1900
Thermal conductivity (W/cm °C)	0.6	1.5	0.81	0.014	—

