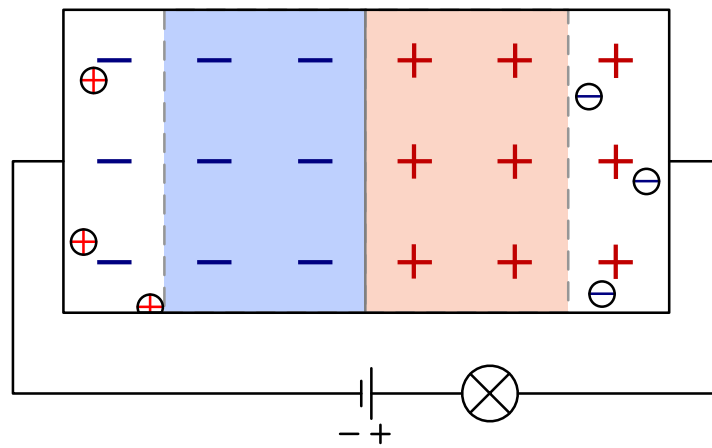


# Halbleitertechnologie

von A bis Z



## Grundlagen

[www.halbleiter.org](http://www.halbleiter.org)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>		<b>IV</b>
<b>1 Grundlagen</b>		<b>1</b>
1.1 Der Atombau . . . . .		1
1.1.1 Das Atommodell . . . . .		1
1.1.2 Größenordnungen . . . . .		2
1.2 Das Periodensystem der Elemente . . . . .		3
1.2.1 Die Elemente . . . . .		3
1.2.2 Das Periodensystem . . . . .		3
1.3 Chemische Bindungen . . . . .		4
1.3.1 Chemische Bindungen . . . . .		4
1.3.2 Die Atombindung . . . . .		5
1.3.3 Die Ionenbindung . . . . .		6
1.3.4 Die Metallbindung . . . . .		6
1.4 Edelgase . . . . .		8
1.5 Leiter – Nichtleiter – Halbleiter . . . . .		9
1.5.1 Leiter . . . . .		9
1.5.2 Nichtleiter . . . . .		10
1.5.3 Halbleiter . . . . .		10
1.5.4 Das Bändermodell . . . . .		11
1.6 Dotieren: n- und p-Halbleiter . . . . .		14
1.6.1 Dotieren . . . . .		14
1.6.2 n-Dotierung . . . . .		15
1.6.3 p-Dotierung . . . . .		16
1.6.4 Bänderschema bei dotierten Halbleitern . . . . .		17

1.7	Der p-n-Übergang . . . . .	17
1.7.1	p-n-Übergang ohne angelegte Spannung . . . . .	17
1.7.2	p-n-Übergang mit angelegter Spannung . . . . .	18
1.8	Aufbau eines n-Kanal-FET . . . . .	19
1.8.1	Allgemeiner Aufbau . . . . .	19
1.8.2	Aufbau eines n-Kanal-FET . . . . .	20
1.8.3	Funktionsweise . . . . .	26
1.9	Aufbau eines Bipolartransistors . . . . .	27
1.9.1	Allgemeiner Aufbau . . . . .	27
1.9.2	Aufbau eines npn-Bipolartransistors . . . . .	28
1.9.3	Funktionsweise . . . . .	30
1.10	Aufbau eines FinFET . . . . .	31
1.10.1	Allgemeiner Aufbau und Funktionsweise . . . . .	31
1.10.2	Aufbau eines FinFET im Bulkprozess . . . . .	32

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Stark vereinfachte Darstellung eines Neonatoms . . . . .	1
1.2	Atombausteine . . . . .	2
1.3	Atome die eine große Bedeutung in der Halbleiterindustrie haben . . . .	2
1.4	Periodensystem der Elemente . . . . .	4
1.5	Atombindung am Beispiel von Silan . . . . .	6
1.6	Prinzip der Ionenbindung am Beispiel von Natriumchlorid . . . . .	7
1.7	Metallbindung . . . . .	8
1.8	Edelgase . . . . .	9
1.9	Metallbindung: Feste Atomrümpfe und freie Valenzelektronen . . . . .	9
1.10	Ausschnitt aus einem Siliciumkristall . . . . .	11
1.11	Aufspaltung von Energieniveaus durch Wechselwirkung von Atomen .	12
1.12	Energiebänder durch in Wechselwirkung stehende Atome . . . . .	12
1.13	Das Bändermodell . . . . .	14
1.14	n-Dotierung mit Phosphor . . . . .	15
1.15	p-Dotierung mit Bor . . . . .	16
1.16	Bändermodell von n- und p-Dotierten Halbleitern . . . . .	17
1.17	p-n-Übergang ohne angelegte Spannung . . . . .	18
1.18	p-n-Übergang mit angeschlossener Spannungsquelle . . . . .	19
1.19	Anreicherungs-Feldeffekttransistor . . . . .	27
1.20	SBC-Bipolartransistor . . . . .	31
1.21	FinFET im Bulk-Prozess . . . . .	34
1.22	FinFET im SOI-Prozess . . . . .	35

# Tabellenverzeichnis

1.1	Bedeutende Elemente in der Halbleitertechnologie . . . . .	5
-----	--	---

# 1 Grundlagen

## 1.1 Der Atombau

### 1.1.1 Das Atommodell

Ein Atom [gr. atomos: unteilbar] ist der kleinste chemisch nicht weiter teilbare Grundbaustein der Materie. Es gibt verschiedene Atome, welche sich aus einer bestimmten Anzahl an Elektronen, Protonen und Neutronen zusammensetzen. Positiv geladene Protonen und ungeladene Neutronen bilden den Atomkern, den negativ geladene Elektronen in bestimmten Abständen umkreisen. Ein in der Natur vorkommendes Atom ist elektrisch neutral, d. h. es befinden sich genauso viele Protonen wie Elektronen im Atom. Die Anzahl der Neutronen kann dabei variieren.

Nach dem Bohrschen Atommodell befinden sich die Elektronen auf so genannten Schalen, welche unterschiedliche Energieniveaus repräsentieren und konzentrisch um den Atomkern angeordnet sind. Es gibt maximal sieben Schalen, die unterschiedlich viele Elektronen aufnehmen können, die Elektronen auf der äußersten Schale werden auch als Valenzelektronen bezeichnet.

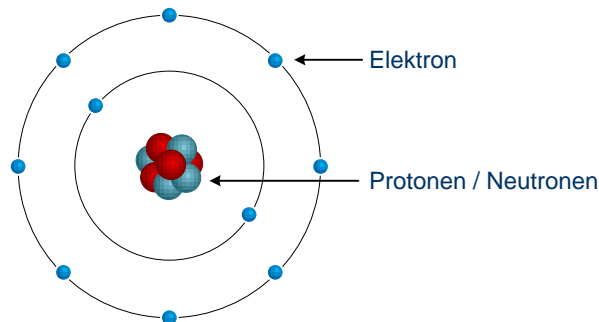


Abb. 1.1: Stark vereinfachte Darstellung eines Neonatoms

Durch den Austausch von Elektronen mit anderen Atomen, können Atome einen stabileren Zustand erreichen, weshalb es zur Bildung von unterschiedlichen Bindungen

von Atomen kommt.

### 1.1.2 Größenordnungen

**Masse:** Die Masse eines Atoms wird hauptsächlich vom Atomkern bestimmt, da die Massen von Protonen und Neutronen mit  $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  rund 1800 Mal größer sind, als die der Elektronen in der Atomhülle ( $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ).

**Abmessungen:** Der Durchmesser der Atomhülle beträgt  $0,1 - 0,5 \text{ nm}$  ( $0,0000000001 \text{ m}$  oder  $1 \text{ Angström}$ ), der Durchmesser des Atomkerns ist noch einmal um den Faktor  $100.000$  geringer.

Zur Veranschaulichung soll ein Stecknadelkopf in der Mitte eines Fußballfeldes als Atomkern betrachtet werden. Dann entspricht die Entfernung zu den Eckfahnen dem Abstand, mit dem die Elektronen den Kern umkreisen.

**Dichte:** Im Kern eines Atoms sind Protonen und Neutronen extrem dicht gepackt. Würde man die Erde auf die gleiche Dichte komprimieren, so würde ihr Radius von ursprünglich  $6.700.000 \text{ m}$  auf nur noch  $100 \text{ m}$  reduziert.




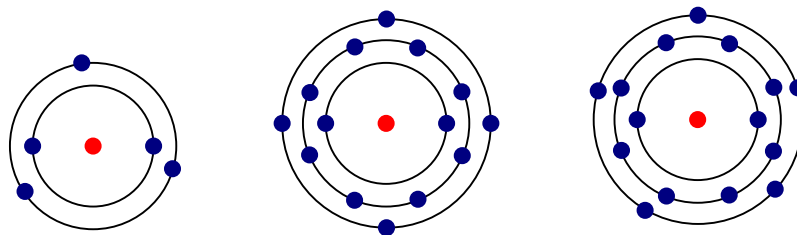
			
<b>Teilchen</b>	Proton	Neutron	Elektron
<b>Ladung</b>	+1	0	-1
<b>Masse</b>	$1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$0,0009 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Abb. 1.2: Atombausteine



**Bor:** 5p 6n 5e

**Silizium:** 14p 14n 14e

**Phosphor:** 15p 15n 15e

3 Außenelektronen

4 Außenelektronen

5 Außenelektronen

Abb. 1.3: Atome die eine große Bedeutung in der Halbleiterindustrie haben



## 1.2 Das Periodensystem der Elemente

### 1.2.1 Die Elemente

Ein Element besteht aus mehreren gleichen Atomen (das bedeutet, mit derselben Anzahl an Protonen = Kernladungszahl) und ist ein Stoff, der mit chemischen Mitteln nicht weiter zerlegt werden kann. Die Masse von Elementen wird nur durch die Anzahl von Protonen und Neutronen bestimmt, da die Elektronenmasse vernachlässigbar gering ist. Wasserstoff mit einem Proton und keinem Neutron hat die Massenzahl 1, das nächst schwerere Element, Helium, besitzt die Massenzahl 4 (2 Protonen + 2 Neutronen). Die Massenzahl gibt die Anzahl der Teilchen im Atomkern an. Multipliziert mit der atomaren Masseneinheit  $u = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  erhält man in etwa die Masse eines Atoms, für Helium  $6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

Die chemischen Elemente werden meist mit den Anfangsbuchstaben ihrer lateinischen oder griechischen Namen benannt (Wasserstoff [H] von lat. hydrogenium, Lithium [Li] von gr. lithos).

### 1.2.2 Das Periodensystem

Das Periodensystem der Elemente (kurz PSE) stellt alle chemischen Elemente mit steigender Protonenanzahl (Kernladung, Ordnungszahl) und entsprechend ihrer chemischen Eigenschaften eingeteilt in Perioden sowie Haupt- und Nebengruppen dar.

Die Periode gibt dabei die Anzahl der Elektronenschalen an, die Hauptgruppe die Anzahl der Elektronen auf der äußersten Schale (1 bis 8 Elektronen). Gruppe 1 und 2 sowie 13 – 18 bilden die Hauptgruppen, die Gruppen 3 – 12 die Nebengruppen.

Um weitere Elektronen aufnehmen zu können, muss eine neue Schale begonnen werden. Somit findet man Lithium Li in Gruppe 1, Periode 2 (zwei Elektronen auf der ersten Schale, ein Valenzelektron auf der zweiten Schale). Eine Schale kann maximal  $2n^2$  Elektronen aufnehmen, wobei  $n$  für die Periode steht.

Nachdem in Gruppe 1 und 2 die ersten beiden Valenzelektronen auf der äußersten Schale besetzt wurden, werden ab der vierten Periode zunächst weiter innenliegende Schalen mit Elektronen vervollständigt, bevor die jeweils äußerste Schale der Gruppen 13 bis 18 vollständig mit Elektronen aufgefüllt wird.

		Hauptgr.		Nebengruppen									Hauptgruppen																														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																								
Periode	1	H																	He																								
	2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne																								
	3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar																								
	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																								
	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																								
	6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																								
	7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo																								
		<table border="1"> <tr> <td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Tb</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td> </tr> <tr> <td>Th</td><td>Ph</td><td>U</td><td>Np</td><td>Pu</td><td>Am</td><td>Cm</td><td>Bk</td><td>Cf</td><td>Es</td><td>Fm</td><td>Md</td><td>No</td><td>Lr</td> </tr> </table>														Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	Ph	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																														
Th	Ph	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																														

Alkalimetalle	Metalle	Halogene	Lanthanoide
Erdalkalimetalle	Halbmetalle	Edelgase	Actinoide
Übergangsmetalle	Nichtmetalle		

Abb. 1.4: Periodensystem der Elemente

Elemente, die sich links im Periodensystem befinden, sind Metalle. Diese haben das Bestreben, Valenzelektronen abzugeben um so eine stabile Elektronenkonfiguration (die Edelgaskonfiguration) zu erreichen. Rechts im Periodensystem stehen die Nichtmetalle, die zum Erreichen der Edelgaskonfiguration zusätzliche Elektronen aufnehmen. Dazwischen befinden sich die Halbmetalle wie Silicium und Germanium.

## 1.3 Chemische Bindungen

### 1.3.1 Chemische Bindungen

Elektronen, die sich auf der äußersten Schale befinden, können sich vom Atom lösen (z.B. durch Zuführen von Energie in Form von Wärme) und mit anderen Atomen ausgetauscht werden. Verbindungen von mehreren Elementen nennt man Moleküle. Der Grund für das Bindungsbestreben ist das Erreichen der mit acht Elektronen voll be-

Element	Teilchen	Eigenschaften, Anwendungen
B Bor	5p, 6n, 5e	3 Außenelektronen: Zur p-Dotierung von Silicium
N Stickstoff	7p, 7n, 7e	Stabiles N <sub>2</sub> -Molekül: Schutz und Spülgas, Schutzschichten auf dem Wafer
O Sauerstoff	8p, 8n, 8e	Sehr reaktionsfreudig: Oxidation von Silicium, Isolationschichten (SiO <sub>2</sub> ) u.a.
F Fluor	9p, 10n, 10e	Reaktionsfreudigstes Element: wird in Verbindung mit anderen Stoffen zum Ätzen verwendet (z.B. HF, CF <sub>4</sub> )
Si Silicium	14p, 14n, 14e	Grundmaterial in der Halbleitertechnik
P Phosphor	15p, 16n, 15e	5 Außenelektronen: Zur n-Dotierung von Silicium

Tab. 1.1: Bedeutende Elemente in der Halbleitertechnologie

setzten äußersten Schale: die so genannte Edelgaskonfiguration. Stoffe, die die volle Außenschale erreicht haben, gehen keine Verbindungen ein (einige wenige Ausnahmen wie z. B. Xenon-Fluor-Verbindungen sind möglich).

Dabei unterscheidet man hauptsächlich zwischen drei verschiedenen Arten von Bindungen, die im Folgenden näher erläutert werden.

### 1.3.2 Die Atombindung

Nichtmetalle gehen diese Verbindung ein um das Elektronenoktett zu vervollständigen. So können zwei Fluoratome (je sieben Außenelektronen) durch gegenseitigen Austausch eines Elektrons ihr Elektronenoktett auffüllen. Der Abstand zwischen den beiden Atomkernen repräsentiert einen Kompromiss zwischen der Anziehung von Atomkern und Bindungselektronen und der Abstoßung der beiden Atomkerne. Der Grund für Atombindungen ist das Bestreben der Natur den energetisch niedrigsten Zustand herzustellen. Da den Elektronen durch den Zusammenschluss mehrerer Atome zu einem Molekül „mehr Raum“ zur Verfügung steht, was einer geringeren Energie entspricht, kommt es überhaupt erst zur Atombindung.

Aus dem Bindungsbestreben zum Erreichen der voll besetzten Außenschale ergibt sich, dass Fluoratome elementar niemals atomar, sondern immer als Fluormolekül (F<sub>2</sub>) auftreten. Dies gilt auch für Stickstoff (N<sub>2</sub>), Sauerstoff (O<sub>2</sub>), Chlor (Cl<sub>2</sub>), Brom (Br<sub>2</sub>) und Jod (I<sub>2</sub>). Auf Grund der Elektronenpaare nennt man diese Bindung auch Elektronenpaarbindung oder kovalente Bindung.

In der folgenden Abbildung ist die Atombindung am Beispiel von Silan ( $\text{SiH}_4$ ) dargestellt (beim Siliciumatom ist nur die äußerste Schale abgebildet). Das Siliciumatom erreicht durch die Bindung die volle Achterschale, die Wasserstoffatome die bereits mit zwei Elektronen voll besetzte erste Schale.

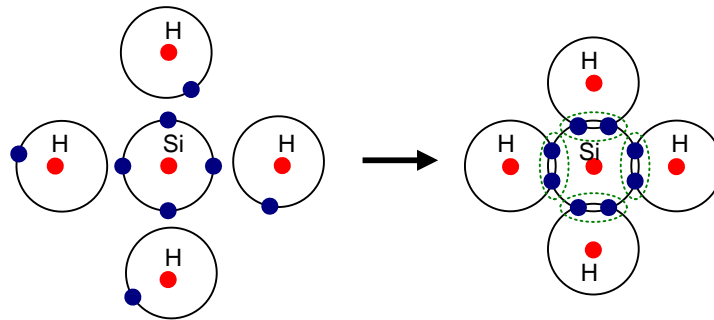


Abb. 1.5: Atombindung am Beispiel von Silan

### 1.3.3 Die Ionenbindung

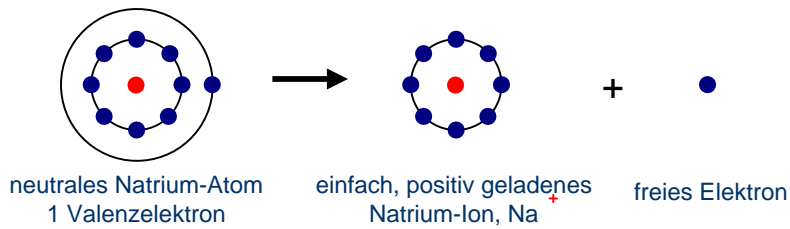
Ionenbindungen entstehen durch den Zusammenschluss von Metallen und Nichtmetallen. Metalle haben das Bestreben, Elektronen abzugeben um eine vollständig gefüllte Außenschale zu erreichen, Nichtmetalle können dagegen zusätzliche Elektronen aufnehmen. Ein Beispiel für eine Ionenbindung ist Natriumchlorid ( $\text{NaCl}$ , Kochsalz).

Das Natriumatom gibt sein Valenzelektron ab (damit besitzt es mehr Protonen als Elektronen und ist positiv geladen), Chlor nimmt ein Elektron auf und ist damit einfach negativ geladen. Durch die unterschiedlichen Ladungen ziehen sich die zwei Atome an. Ein geladenes Atom bezeichnet man als Ion, dabei unterscheidet man zwischen Kation (positive Ladung) und Anion (negative Ladung).

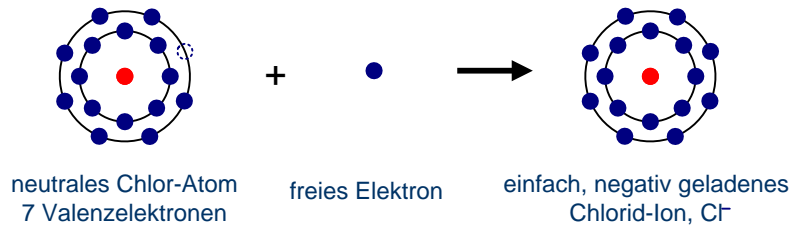
Da die Atome immer in einer sehr hohen Anzahl auftreten, richten sie sich dabei Dank der Anziehungs- und Abstoßungskräfte zu einem gleichmäßigen Ionengitter aus. Stoffe, die im festen Zustand ein solches Gitter bilden, bezeichnet man als Salze.

### 1.3.4 Die Metallbindung

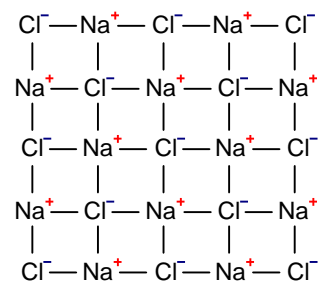
Metalle gehen diese Bindung ein, um die stabile Edelgaskonfiguration zu erreichen. Dazu gibt jedes Metallatom seine Außenelektronen ab: es entstehen positiv geladene



(a) Natrium als positives Kation



(b) Chlor als negatives Anion



(c) NaCl-Ionengitter

Abb. 1.6: Prinzip der Ionenbindung am Beispiel von Natriumchlorid

Metallionen (Atomrümpfe) und freie Elektronen zwischen denen starke Anziehungskräfte herrschen. Die Metallionen stoßen sich untereinander ebenso ab wie die Elektronen.

Da die Anziehungs- und Abstoßungskräfte in alle Richtungen des Raumes wirken ordnen sich die Atomrümpfe zu einem regelmäßigen Gitter an. In den Zwischenräumen befinden sich die frei beweglichen Elektronen als so genanntes Elektronengas, dieses hält die positiven Metallionen zusammen. Auf Grund der frei beweglichen Elektronen leiten Metalle den elektrischen Strom sehr gut.

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Verbindungen sind von der Bindungsart abhängig. So bedeuten stärkere Anziehungskräfte höhere Schmelz- und Sie-

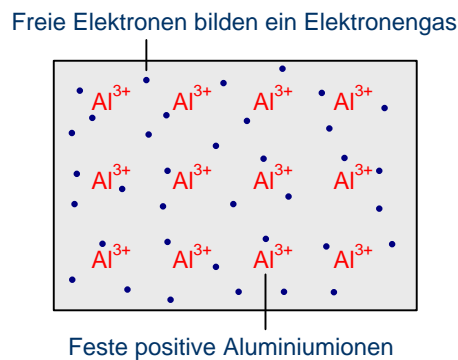


Abb. 1.7: Metallbindung

depunkte, die Anzahl der freien Elektronen beeinflusst die Leitfähigkeit.

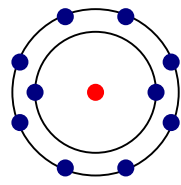
## 1.4 Edelgase

Edelgase sind die Elemente in der achten Hauptgruppe im Periodensystem: Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon, Radon (v. o. n. u.).

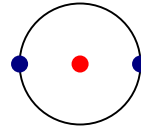
Die Besonderheit dieser Elemente ist, dass sie auf der äußersten Schale acht Elektronen besitzen. Dieses Elektronenoktett repräsentiert einen energetisch sehr stabilen Zustand, den alle Elemente einnehmen wollen. Im Kapitel Bindungen wird erläutert, wie die Elemente die volle Achterschale erreichen. Auf Grund des stabilen Zustands der Edelgaskonfiguration gehen diese Elemente so gut wie keine Reaktionen ein (einige wenige Xenon-Fluor-Verbindungen u. a. gibt es).

Das Neonatom besitzt 10 Elektronen: zwei auf der ersten und acht Valenzelektronen auf der zweiten/äußersten Schale. Ausnahme: Das Heliumatom, welches nur eine Schale besitzt, erreicht den Edelgaszustand bereits mit zwei Elektronen (Elektronenduet).

Als Inertgase [lat. inert: untätig, träge] finden unter anderem Stickstoff (z.B. als Spülgas bei Ofenprozessen) und Argon (z.B. bei Sputterprozessen) in der Halbleiterherstellung Anwendung.



Neon: 8 Valenzelektronen  
auf der zweiten Schale



Helium: 2 Valenzelektronen  
auf der ersten Schale

Abb. 1.8: Edelgase

## 1.5 Leiter – Nichtleiter – Halbleiter

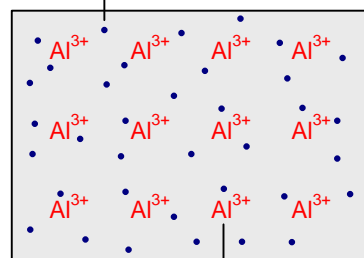
### 1.5.1 Leiter

Leiter sind generell Stoffe, die die Eigenschaft haben verschiedene Energiearten weiterzuleiten. Im Folgenden steht dabei die Leitfähigkeit des elektrischen Stroms im Vordergrund.

#### Metalle:

Die Leitfähigkeit von Metallen beruht auf den freien Elektronen die bei der Metallbindung als Elektronengas vorliegen. Bereits mit wenig Energie werden genug Elektronen von den Atomen gelöst um eine Leitfähigkeit zu erreichen.

Freie Elektronen bilden ein Elektronengas



Feste positive Aluminiumionen

Abb. 1.9: Metallbindung: Feste Atomrümpfe und freie Valenzelektronen

Die Leitfähigkeit hängt unter anderem von der Temperatur ab. Steigt diese an, schwingen die Atomrümpfe immer stärker, so dass die Elektronen in ihren Bewegungen behindert werden und infolge dessen der Widerstand ansteigt. Die besten Leiter, Gold und Silber, werden auf Grund der hohen Kosten relativ selten eingesetzt (Gold u.a.

bei der Kontaktierung der fertigen Chips). Die Alternativen in der Halbleitertechnologie zur Verdrahtung der einzelnen Komponenten eines Chips sind Aluminium und Kupfer.

**Salze:**

Neben Metallen können auch Salze elektrischen Strom leiten. Freie Elektronen gibt es hier jedoch nicht. Die Leitfähigkeit beruht auf den Ionen die sich beim Schmelzen oder Lösen von Salzen aus dem Gitterverbund lösen und frei beweglich sind (siehe Thema Bindungen).

### 1.5.2 Nichtleiter

Nichtleiter besitzen keine freien Ladungsträger in Form von Elektronen oder Ionen. Nichtleiter nennt man auch Isolatoren.

**Atombindung:**

Die Atombindung beruht auf gemeinsamen Elektronenpaaren von Nichtmetallen. Die Elemente mit Nichtmetallcharakter haben alle das Bestreben Elektronen aufzunehmen, somit sind keine freien Elektronen vorhanden die eine Leitfähigkeit bewirken könnten.

**Ionenbindung:**

Im festen Zustand sind Ionen in einem Gitterverbund angeordnet. Durch elektrische Kräfte werden die Teilchen zusammengehalten. Es sind keine freien Ladungsträger für den Stromfluss vorhanden. So können Stoffe, die sich aus Ionen zusammensetzen, sowohl Leiter (im gelösten Zustand) als auch Nichtleiter sein.

### 1.5.3 Halbleiter

Halbleiter sind Feststoffe, deren Leitfähigkeit zwischen der von Leitern und Nichtleitern liegt. Durch Elektronenaustausch gleichartiger Atome, um das Elektronenoktett zu vervollständigen, ordnen sich diese als Gitterstruktur an. Im Gegensatz zu Metallen nimmt die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur – bis zu einem gewissen Maß – zu.

Durch den Temperaturanstieg brechen Bindungen auf und Elektronen werden freigesetzt. An der Stelle an der sich das Elektron befand verbleibt ein so genanntes Defektelektron (auch Loch).



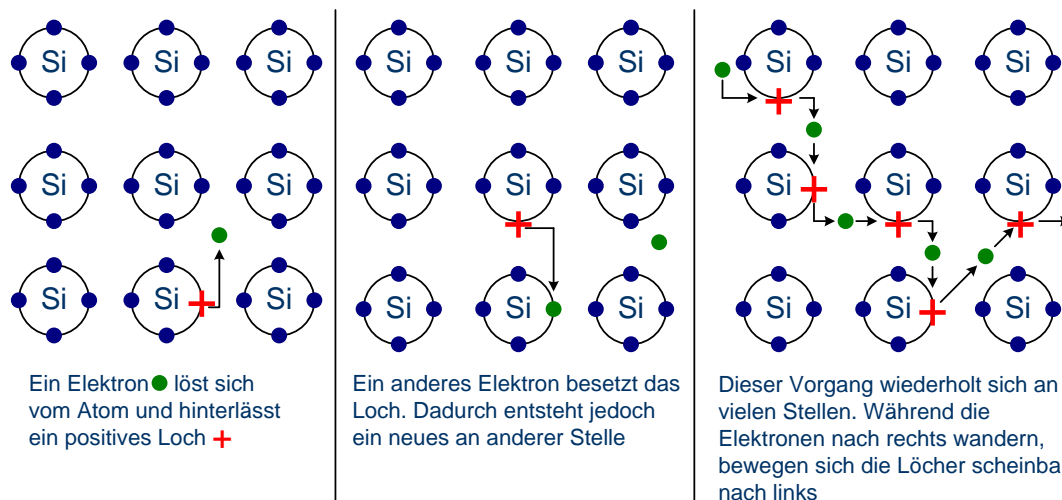


Abb. 1.10: Ausschnitt aus einem Siliciumkristall

Der Elektronenfluss beruht auf der Eigenleitfähigkeit von Halbleitern. Das so genannte Bändermodell veranschaulicht, warum sich Halbleiter so verhalten.

#### 1.5.4 Das Bändermodell

Das Bändermodell ist ein Energieschema, mit Hilfe dessen man die Leitfähigkeit von Leitern, Isolatoren und Halbleitern beschreiben kann. Das Modell besteht aus zwei Energiebändern (Valenz- und Leitungsband) und der Bandlücke. Die Valenzelektronen – die als Ladungsträger dienen – befinden sich im Valenzband; das Leitungsband ist im Grundzustand nicht mit Elektronen besetzt. Zwischen den beiden Energiebändern befindet sich die Bandlücke, ihre Breite beeinflusst u.a. die Leitfähigkeit.

##### Die Energiebänder

Betrachtet man ein einzelnes Atom, so gibt es nach dem Bohrschen Atommodell scharf voneinander getrennte Energieniveaus, die von Elektronen besetzt werden können. Befinden sich mehrere Atome nebeneinander, so stehen diese miteinander in Wechselwirkung und die diskreten Energieniveaus werden aufgefächert. In einem Siliciumkristall gibt es ca.  $10^{23}$  Atome pro Kubikzentimeter, so dass die einzelnen Energieniveaus nicht mehr von einander unterscheidbar sind und breite Energiebereiche bilden.

Die Breite der Energiebänder hängt davon ab, wie stark die Elektronen an das Atom gebunden sind. Die Valenzelektronen im höchsten Energieniveau wechselwirken stark

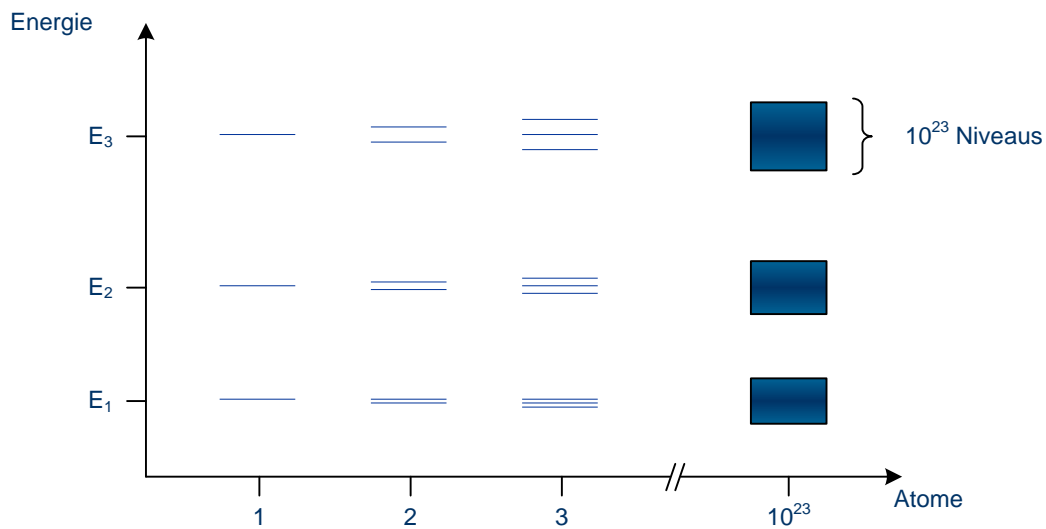


Abb. 1.11: Aufspaltung von Energieniveaus durch Wechselwirkung von Atomen

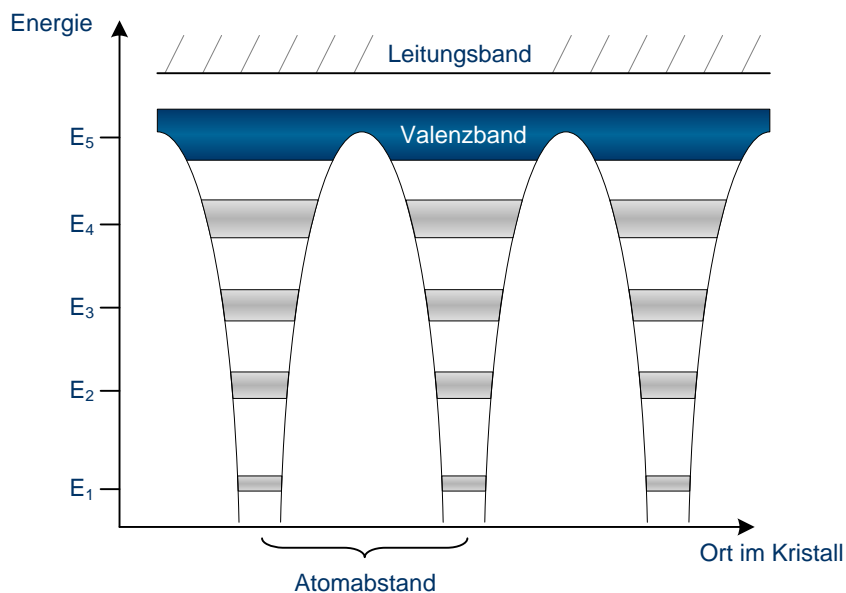


Abb. 1.12: Energiebänder durch in Wechselwirkung stehende Atome

mit denen der Nachbaratome und können relativ leicht vom Atom gelöst werden, bei einer sehr großen Anzahl an Atomen lässt sich ein einzelnes Elektron nicht mehr einem bestimmten Atom zuordnen. In Folge dessen verschmelzen die Energiebänder der einzelnen Atome zu einem kontinuierlichen Band, dem Valenzband.

### **Das Bändermodell bei Leitern:**

Bei Leitern ist das Valenzband entweder nicht voll mit Elektronen besetzt, oder das gefüllte Valenzband überlappt sich mit dem leeren Leitungsband. In der Regel treffen beide Zustände gleichzeitig zu, die Elektronen können sich also im nur teilweise besetzten Valenzband oder in den zwei sich überlappenden Bändern bewegen. Die Bandlücke, die sich zwischen Valenz- und Leitungsband befindet, existiert bei Leitern nicht.

### **Das Bändermodell bei Nichtleitern:**

Bei Isolatoren ist das Valenzband durch die Bindungen der Atome voll mit Elektronen besetzt. Sie können sich darin nicht bewegen, da sie zwischen den Atomen „eingesperrt“ sind. Um leiten zu können müssten sich die Elektronen aus dem voll besetzten Valenzband in das Leitungsband bewegen. Das verhindert die Bandlücke, die zwischen Valenz- und Leitungsband liegt.

Nur mit sehr großem Energieaufwand (falls überhaupt möglich) kann diese Lücke überwunden werden (in der Bandlücke darf sich nach den Gesetzen der Quantenphysik kein Elektron aufhalten).

### **Das Bändermodell bei Halbleitern:**

Auch bei Halbleitern gibt es diese Bandlücke, diese ist im Vergleich zu Isolatoren aber so klein, dass bereits bei Raumtemperatur Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gelangen. Die Elektronen können sich hier nun frei bewegen und stehen als Ladungsträger zur Verfügung. Jedes Elektron hinterlässt außerdem ein Loch im Valenzband, welches von anderen Elektronen im Valenzband besetzt werden kann. Somit erhält man wandernde Löcher im Valenzband, die als positive Ladungsträger angesehen werden können.

Da die Elektronen immer den energetisch günstigsten Zustand annehmen, fallen sie ohne Energiezufuhr wieder in das Valenzband zurück und rekombinieren mit den Löchern. Bei einer bestimmten Temperatur stellt sich ein Gleichgewicht zwischen den ins Leitungsband gehobenen und den zurückfallenden Elektronen ein. Mit zunehmender Temperatur erhöht sich die Anzahl der Elektronen, die die Bandlücke überspringen können. Mit steigender Temperatur nimmt also die Leitfähigkeit von Halbleitern zu.

Es treten immer Elektronen-Loch-Paare auf, es gibt also ebenso viele negative wie positive Ladungen, der Halbleiterkristall ist insgesamt neutral. Ein reiner, undotierter Halbleiter wird als intrinsischer Halbleiter bezeichnet, pro Kubikzentimeter gibt es in

etwa  $10^{10}$  freie Elektronen und Löcher (bei Raumtemperatur).

Da die Breite der Bandlücke einer bestimmten Energie und somit einer bestimmten Wellenlänge entspricht, versucht man, die Bandlücke gezielt zu verändern um so bestimmte Farben bei Leuchtdioden zu erhalten. Dies kann u.a. durch Kombination verschiedener Stoffe erreicht werden. Galliumarsenid (GaAs) hat eine Bandlücke von 1,4 Elektronenvolt (eV, bei Raumtemperatur) und strahlt somit rotes Licht ab.

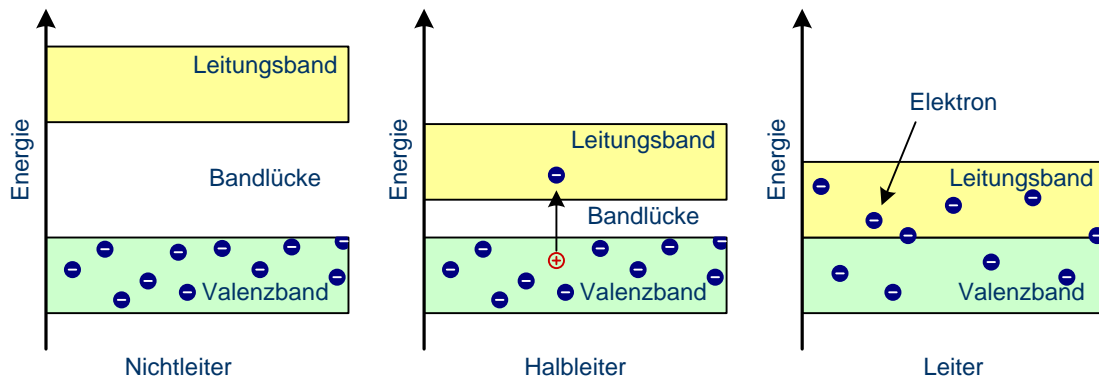


Abb. 1.13: Das Bändermodell

Die Eigenleitfähigkeit von Silicium ist für die Funktionsweise von Bauelementen uninteressant, da sie sehr stark von der zugeführten Energie abhängt. Sie ändert sich also auch mit der Betriebstemperatur, eine mit Metallen vergleichbare Leitfähigkeit stellt sich zudem erst mit sehr hohen Temperaturen ein (mehrere Hundert Grad Celsius). Um die Leitfähigkeit von Halbleitern gezielt zu beeinflussen, können Fremdatome in das regelmäßige Siliciumgitter eingebaut, und damit die Ladungsträgerkonzentration von Elektronen und Löchern eingestellt werden.

## 1.6 Dotieren: n- und p-Halbleiter

### 1.6.1 Dotieren

Dotieren bedeutet das Einbringen von Fremdatomen in einen Halbleiterkristall zur gezielten Veränderung der Leitfähigkeit. Zwei der wichtigsten Stoffe, mit denen Silicium dotiert werden kann, sind Bor (3 Valenzelektronen = 3-wertig) und Phosphor (5 Valenzelektronen = 5-wertig). Weitere sind: Aluminium, Indium (3-wertig) und Arsen, Antimon (5-wertig).

Die Dotierelemente werden in die Gitterstruktur des Halbleiterkristalls eingebaut, die Anzahl der Außenelektronen bestimmt die Art der Dotierung. Elemente mit 3 Valenzelektronen werden zur p-Dotierung benutzt, 5-wertige Elemente zur n-Dotierung. Die Leitfähigkeit eines gezielt verunreinigten Siliciumkristalls kann so um den Faktor  $10^6$  erhöht werden.

### 1.6.2 n-Dotierung

Das 5-wertige Dotierelement besitzt ein Außenelektron mehr als die Siliciumatome. Vier Außenelektronen können sich mit je einem Siliciumatom binden, das fünfte ist frei beweglich und dient als Ladungsträger. Dieses ungebundene Elektron benötigt sehr viel weniger Energie um vom Valenzband in das Leitungsband gehoben zu werden, als die Elektronen, die die Eigenleitfähigkeit des Siliciums verursachen. Das Dotierelement, welches ein Elektron abgibt, wird als Elektronendonator (donare, lat. = geben) bezeichnet.

Die Dotierelemente werden durch die Abgabe negativer Ladungsträger positiv geladen und sind fest im Gitter eingebaut, es bewegen sich nur die Elektronen. Dotierte Halbleiter, deren Leitfähigkeit auf freien (negativen) Elektronen beruht sind n-leitend bzw. n-dotiert. Während Löcher (und ebenso viele Elektronen) im Kristall jederzeit spontan erzeugt werden können, überwiegt nun die Anzahl freier Elektronen durch die eingebrachten Donatoren, weshalb diese als Majoritätsladungsträger bezeichnet werden. Löcher hingegen als Minoritätsladungsträger.

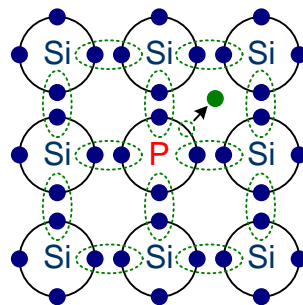


Abb. 1.14: Das Phosphor-Atom gibt sein 5. Elektron ab, das keine Bindung eingehen kann. Es dient als freier Ladungsträger.

Arsen wird als Alternative zu Phosphor verwendet, da dessen Diffusionskoeffizient geringer ist. Das bedeutet, dass der Dotierstoff bei späteren Prozessschritten weniger

stark diffundiert und die Dotierung somit an der Stelle bleibt, wo sie eingebracht wurde.

### 1.6.3 p-Dotierung

Im Gegensatz zum freien Elektron bei der Dotierung mit Phosphor bewirken 3-wertige Dotierelemente genau das Gegenteil. Sie können ein zusätzliches Außenelektron aufnehmen und hinterlassen so ein Loch im Valenzband der Siliciumatome. Dadurch werden die Elektronen im Valenzband beweglich. Die Löcher bewegen sich in entgegengesetzter Richtung zur Elektronenbewegung. Die dazu nötige Energie beträgt bei Indium als Dotierelement nur 1 % der Energie die nötig ist, um die Valenzelektronen der Siliciumatome in das Leitungsband zu heben.

Durch die Aufnahme eines Elektrons wird das Dotierelement einfach negativ geladen; solche Dotieratome nennt man Elektronenakzeptor (acceptare, lat. = aufnehmen). Auch hier ist das Dotierelement fest im Kristallgitter eingebaut, es bewegt sich nur die positive Ladung. P-leitend oder p-dotiert nennt man diese Halbleiter weil die Leitfähigkeit auf **positiven** Löchern beruht. Analog zu n-dotierten Halbleitern, sind hier die Löcher die Majoritätsladungsträger, freie Elektronen die Minoritätsladungsträger.

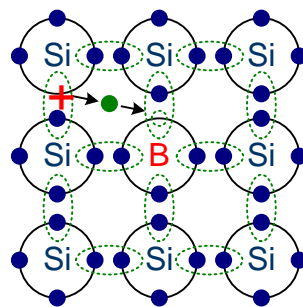


Abb. 1.15: Die freie Stelle am Bor-Atom wird von anderen Elektronen aufgefüllt. Dabei entstehen an anderer Stelle neue Löcher. Diese Leerstellen wandern scheinbar entgegengesetzt zum Elektronenfluss

Nach außen sind dotierte Halbleiter elektrisch neutral. Die Bezeichnungen n- bzw. p-Dotierung beziehen sich nur auf die Majoritätsladungsträger.

N- und p-dotierte Halbleiter verhalten sich in Bezug auf den Stromfluss annähernd gleich. Mit steigender Anzahl an Dotierelementen nimmt auch die Zahl von Ladungsträgern im Halbleiterkristall zu. Dabei genügt schon eine sehr geringe Menge an Dotierelementen. Schwach dotierte Siliciumkristalle enthalten nur 1 Fremdatom pro 1.000.000.000

Siliciumatomen, bei den höchsten Dotierungen ist das Verhältnis von Fremdatomen zu Siliciumatomen z. B. 1 zu 1000.

### 1.6.4 Bänderschema bei dotierten Halbleitern

Bei n-dotierten Halbleitern steht durch das Einbringen eines Dotierelements mit fünf Außenelektronen ein Elektron im Kristall zur Verfügung das nicht gebunden ist, und so mit vergleichsweise geringer Energie in das Leitungsband gehoben werden kann. Somit findet man in n-dotierten Halbleitern ein Donatorniveau nahe der Leitungsbandkante, die zu überwindende Bandlücke ist sehr klein.

Durch das Einbringen eines 3-wertigen Dotierelements steht bei p-dotierten Halbleitern eine Leerstelle zur Verfügung, die schon mit geringer Energie von einem Elektron aus dem Valenzband besetzt werden kann. Bei p-dotierten Halbleitern befindet sich somit ein Akzeptorniveau nahe der Valenzbandkante.

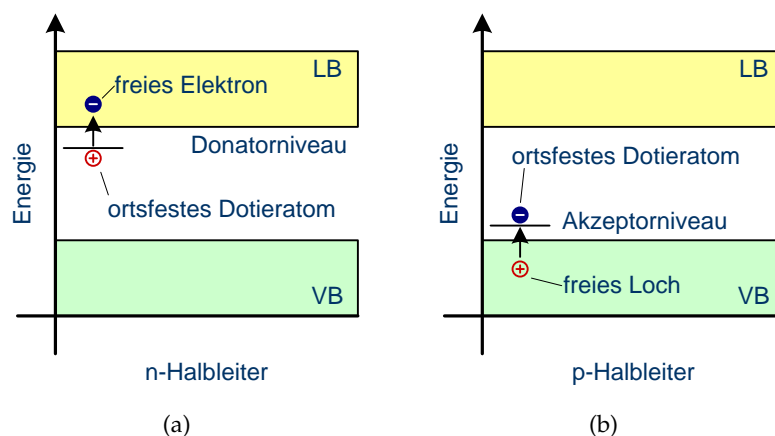


Abb. 1.16: Bändermodell von n- und p-Dotierten Halbleitern

## 1.7 Der p-n-Übergang

### 1.7.1 p-n-Übergang ohne angelegte Spannung

Der p-n-Übergang ist der Übergangsbereich aneinander liegender n- und p-dotierter Halbleiterkristalle. In diesem Bereich gibt es keine freien Ladungsträger, da die freien

Elektronen des n-Leiters und die freien Löcher des p-dotierten Kristalls in der Nähe der Kontaktfläche der zwei Kristalle miteinander rekombinieren, d. h. die Elektronen besetzen die freien Löcher. Diese Ladungsträgerbewegung (Diffusion) ergibt sich in Folge eines Konzentrationsgefälles: da es im p-Kristall nur wenige Elektronen und im n-Kristall nur wenige Löcher gibt, wandern die Majoritätsladungsträger (Elektronen im n-Gebiet, Löcher im p-Gebiet) in den jeweils andersartig dotierten Halbleiterkristall. Das Kristallgitter an der Grenzfläche darf nicht unterbrochen werden, ein einfaches „Aneinanderpressen“ eines p- und eines n-dotierten Siliciumkristalls ermöglicht keinen funktionstüchtigen p-n-Übergang.

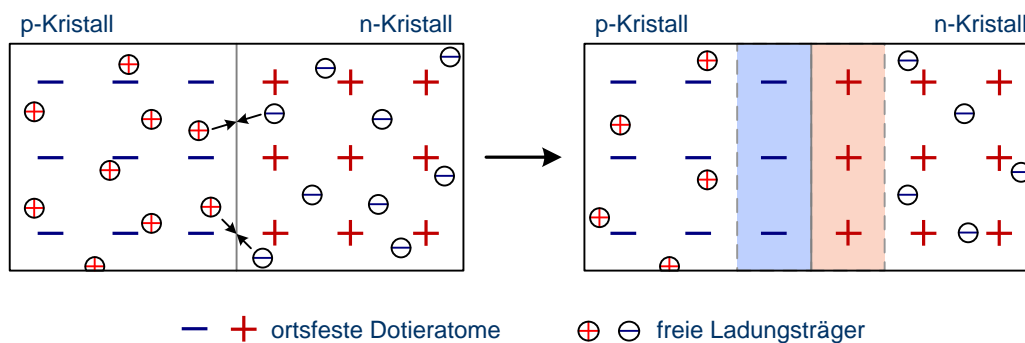


Abb. 1.17: p-n-Übergang ohne angelegte Spannung

Die Gebiete in Nähe der Grenzschicht sind auf Grund der abgewanderten freien Ladungsträger positiv (n-Kristall) bzw. negativ (p-Kristall) geladen. Je mehr Ladungsträger rekombinieren, desto größer wird diese Verarmungs- oder Raumladungszone (RLZ) und damit die Spannungsdifferenz von n- zu p-Kristall. Bei einer bestimmten Höhe dieses Potentialgefälles kommt die Rekombination der Löcher und Elektronen zum Erliegen, die Ladungsträger können das elektrische Feld nicht mehr überwinden. Bei Silicium liegt diese Grenze bei etwa  $0,7 \text{ V}$  (vgl. Bändermodell eines p-n-Übergangs).

Ein p-n-Übergang entspricht einem elektrischen Bauteil, welches durch Anlegen von Spannung den Strom in der einen Richtung leitet (Durchlassrichtung) und in der anderen sperrt (Sperrrichtung): eine Diode.

### 1.7.2 p-n-Übergang mit angelegter Spannung

Wird am n-Kristall eine positive und am p-Kristall eine negative Spannung angelegt, so zeigen das elektrische Feld im Inneren und das durch die Spannungsquelle erzeugte in



die gleiche Richtung. Das Feld am p-n-Übergang wird damit verstärkt. Die jeweils entgegengesetzt geladenen freien Ladungsträger werden von den Polen der Spannungsquelle angezogen, dadurch wird die Sperrschicht vergrößert und es ist kein Stromfluss möglich.

Polrt man die angelegte Spannung an den Halbleiterkristallen um, überlagert das durch die Spannungsquelle erzeugte elektrische Feld das innere in entgegengesetzter Richtung und schwächt es ab. Wird das innere Feld vollständig vom äußeren abgebaut, fließen ständig neue Ladungsträger von der Stromquelle zur Sperrschicht und können hier fortlaufend rekombinieren: es fließt Strom.

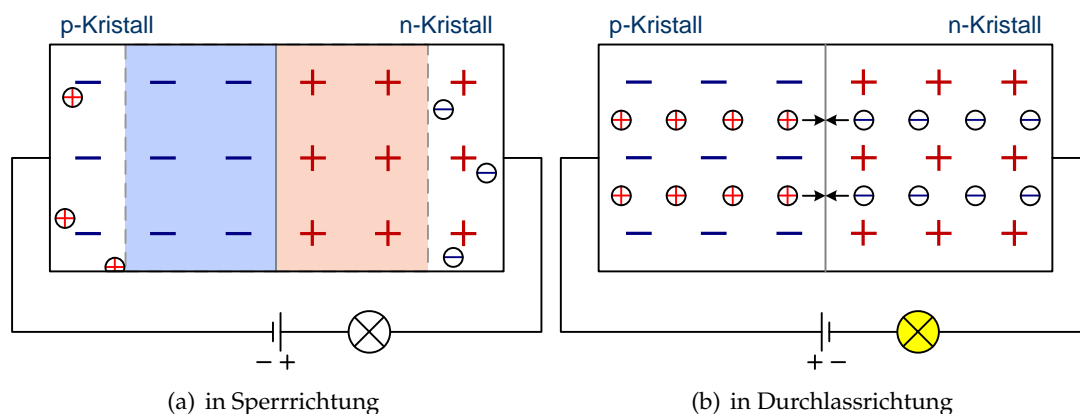


Abb. 1.18: p-n-Übergang mit angeschlossener Spannungsquelle

Die Diode lässt sich auf Grund dieses Verhaltens als Gleichrichter verwenden: zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom. Bereiche, in denen p- und n-dotierte Halbleiterkristalle in Kontakt stehen, kommen in vielen elektrischen Bauelementen der Halbleitertechnologie vor.

## 1.8 Aufbau eines n-Kanal-FET

### 1.8.1 Allgemeiner Aufbau

Ein Transistor ist ein elektronisches Halbleiterbauelement das zum Schalten oder Verstärken von Strom verwendet werden kann. Der Stromfluss erfolgt über zwei Anschlüsse (Drain, Source), während der dritte (Gate) zur Steuerung dient. Neben dem Feldeffekttransistor (FET) gibt es noch einen weiteren grundlegenden Transistortyp,

den Bipolartransistor. Bei ihm heißen die Anschlüsse Emitter (Source beim FET), Basis (Gate) und Kollektor (Drain). Die Funktionsweise des Bipolartransistors beruht auf Ladungsträgern beider Polaritäten (daher **bipolar**), Löchern und Elektronen. Beim Feldeffekttransistor, auch als **unipolarer** Transistor bezeichnet, sind abhängig von der Bauart entweder Elektronen *oder* Löcher am Stromtransport beteiligt.

Bei dem nachfolgend beschriebenen Transistor handelt es sich um einen sogenannten MOSFET (engl. metal oxide semiconductor field-effect transistor, Metall-Oxid-Halbleiter-FET). Obwohl heute meist hochdotiertes Polysilicium als Gatematerial Verwendung findet und kein Aluminium mehr zum Einsatz kommt, wird auch bei diesem Transistortyp nach wie vor die Bezeichnung MOSFET benutzt. Besser wäre in diesem Fall die Bezeichnung IGFET (engl. insulated gate FET, FET mit isoliertem Gate). Bei neuartigen Transistoren mit High-k-Metal-Gate-Technologie ist die Bezeichnung MOSFET dagegen wieder korrekt, sofern als Isolator weiterhin ein Oxid verwendet wird.

Der Transistor ist das grundlegende Bauelement in der Halbleiterfertigung, in modernen Mikrochips finden sich mehrere hundert Millionen bis Milliarden Transistoren. Durch die Kombination mehrerer Transistoren können sämtliche logische Gatter realisiert werden, um aus Eingangssignalen entsprechende logische Ausgangssignale zu erhalten. Dadurch bilden Transistoren das Herzstück eines jeden Mikroprozessors, Speicherchips usw. Der Transistor ist die von der Menschheit in der höchsten Gesamtstückzahl produzierte technische Funktionseinheit, und aus dem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken.

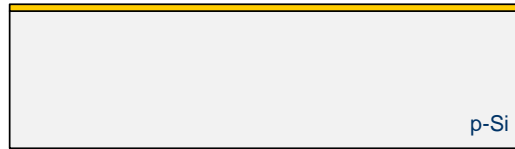
Der Transistor wird in der Produktion Schicht für Schicht aufgebaut. Dabei steht hier der grundlegende Aufbau eines einfachen MOSFETs im Vordergrund, die verschiedenen Möglichkeiten zur Realisierung dieser Schichten folgen in den späteren Kapiteln.

### 1.8.2 Aufbau eines n-Kanal-FET

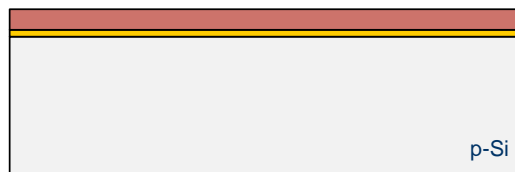
**1. Substrat:** Grundlage für einen n-Kanal-Feldeffekttransistor ist ein p-dotiertes Siliciumsubstrat, als Dotierstoff dient Bor.



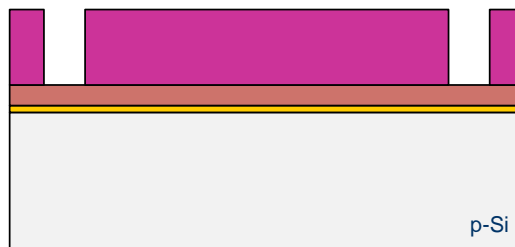
**2. Oxidation:** Auf dem Substrat wird Siliciumdioxid  $\text{SiO}_2$  (das Gateoxid, kurz GOX) in einer Trockenoxidation erzeugt. Es dient zur Isolation zwischen dem später abgeschiedenen Gate und dem Substrat.



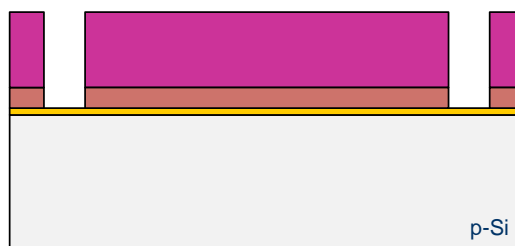
**3. Abscheidung:** In einem LPCVD-Prozess wird Nitrid abgeschieden, es dient später bei der Feldoxidation als Maskierung.



**4. Fototechnik:** Auf dem Nitrid wird ein Fotolack aufgebracht, belichtet und entwickelt. So erhält man eine strukturierte Lackschicht, die als Ätzmaske dient.



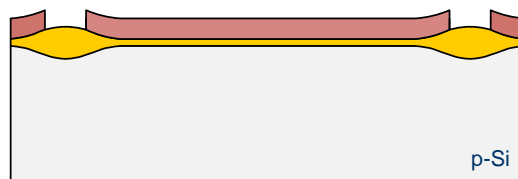
**5. Ätzen:** Der Lack maskiert das Nitrid, lackfreie Bereiche werden mittels reaktivem Ionenätzen entfernt.



**6. Lackentfernen:** Nach der Strukturübertragung der Lackmaske in das Nitrid, wird der Resist mit einer Entwicklerlösung nasschemisch entfernt.



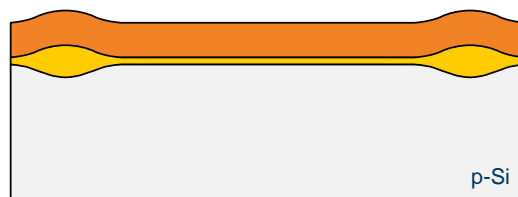
**7. Oxidation:** Nitrid dient als Maske, nur auf den Nitrid freien Bereichen findet eine thermische Nassoxidation statt. Das Feldoxid (FOX, z. B. 700 nm) dient zur seitlichen Isolation zu benachbarten Bauteilen.



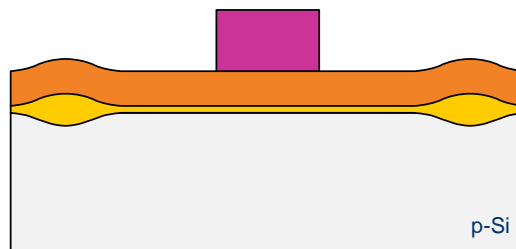
**8. Ätzen:** Nach der Oxidation wird das Nitrid in einem nasschemischen Ätzprozess entfernt.



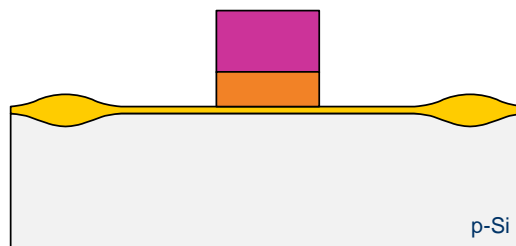
**9. Abscheidung:** In einem LPCVD-Prozess wird polykristallines Silicium abgeschieden.



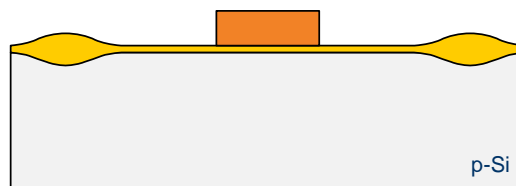
**10. Fototechnik:** Auf dem Polysilicium wird eine Lackschicht als Ätzmaske strukturiert.



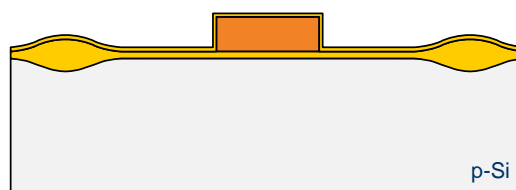
**11. Ätzen:** Der Fotolack dient wiederum als Lackmaske, in einem reaktiven Ionenätzschritt wird das Silicium strukturiert. Es dient als Gateelektrode zur Steuerung des Transistors.



**12. Lackentfernen:** Der Lack wird nach dem Ätzschritt wieder nasschemisch entfernt.

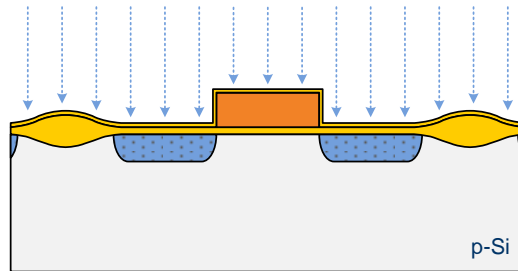


**13. Oxidation:** Nachfolgend wird ein dünnes Oxid, das Postoxid abgeschieden. Es dient zum einen als Schutz der Gateelektrode, zum anderen als Spacer für die Source-/Drainimplantation.

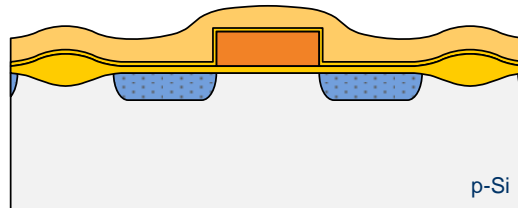


**14. Ionenimplantation:** In einem Implantationsschritt mit Phosphorionen werden das Source- und Draingebiet n-dotiert. Da die Gateelektrode als Implantationsmaske dient

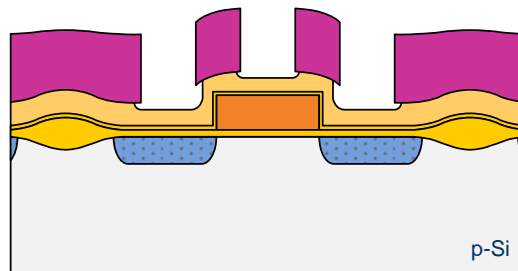
und so die Weite des n-Kanals zwischen Source und Drain vorgegeben ist, bezeichnet man dies als Selbstjustierung.



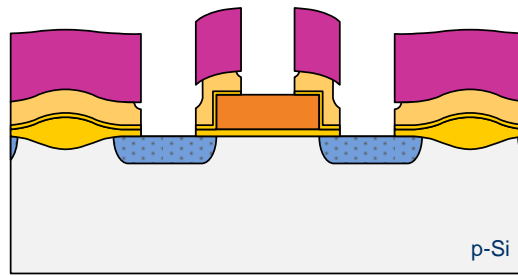
**15. Oxidation:** Als Isolation zu darüberliegenden Metallisierungsschichten, wird ein Oxid (das Zwischenoxid, kurz ZOx, z. B. 700 nm) abgeschieden. Dies geschieht in einem LPCVD-Prozess mit TEOS, welches eine gute Kantenbedeckung bietet.



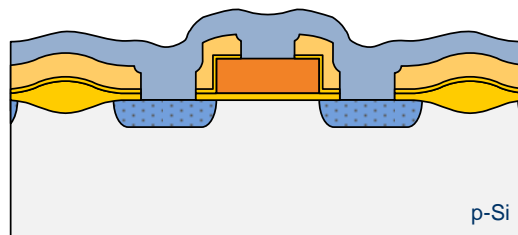
**16. Fototechnik und Ätzen:** Darüber wird eine weitere Lackschicht strukturiert und in einem isotropen Ätzprozess die Kanten der Kontaktlöcher verrundet.



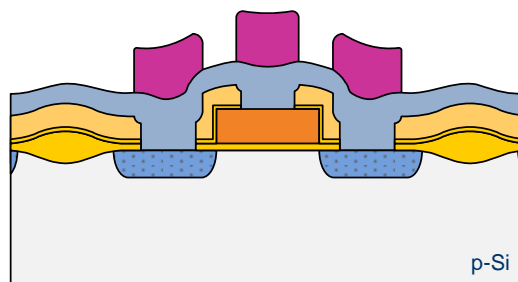
**17. Ätzen:** Anschließend werden die Kontaktlöcher in einem anisotropen Ätzprozess bis zu den n-dotierten Gebieten freigelegt.



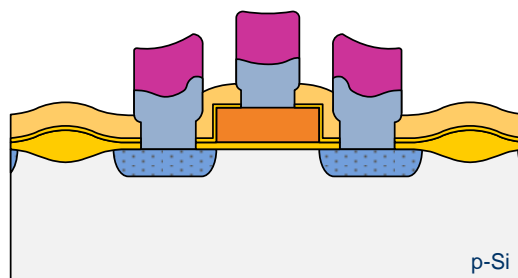
**18. Metallisierung:** Die Kontaktlöcher werden in einem Sputterprozess mit Aluminium aufgefüllt.



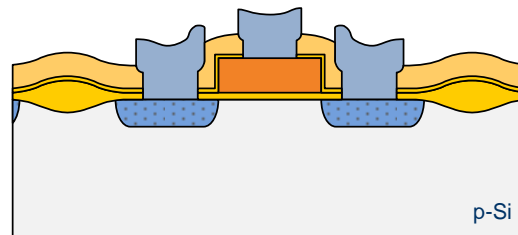
**19. Fototechnik:** In einem letzten Lithografieschritt wird eine weitere Lackschicht strukturiert.



**20. Ätzen:** Die Lackstrukturen werden in einem anisotropen Trockenätzschritt in die darunterliegende Metallisierungsebene übertragen.



**21. Lackentfernen:** Abschließend wird der Resist entfernt, zurück bleiben Aluminiumleiterbahnen zur Ansteuerung des Transistors.



Der tatsächliche Aufbau eines Transistors ist wesentlich komplexer. So können zusätzliche Planarisierungsschichten zur Unterstützung der lithografischen Prozesse zum Einsatz kommen und auch mehrere Drain-/Sourceimplantationen erfolgen um die Einsatzspannung exakt einzustellen. Ebenso sind weitere Spacer („Abstandshalter“) am Gate möglich, um die Kanallänge exakt zu justieren bzw. das Dotierprofil zu beeinflussen.

### 1.8.3 Funktionsweise

#### Anreicherungs-FET:

Ohne eine positive Spannung am Gate stehen zwischen Source und Drain keine freien Ladungsträger in Form von Elektronen Verfügung, da das Substrat p-dotiert ist. Im stationären Zustand sind hier Löcher die Majoritätsladungsträger und Elektronen Minoritätsladungsträger.

Durch eine positive Spannung am Gate werden Elektronen durch das elektrische Feld aus dem Substrat angezogen (Löcher dementsprechend verdrängt) und bilden so einen leitenden n-Kanal zwischen Source und Drain. Die isolierende Siliciumdioxidschicht verhindert einen Stromfluss zwischen Substrat und Gate.



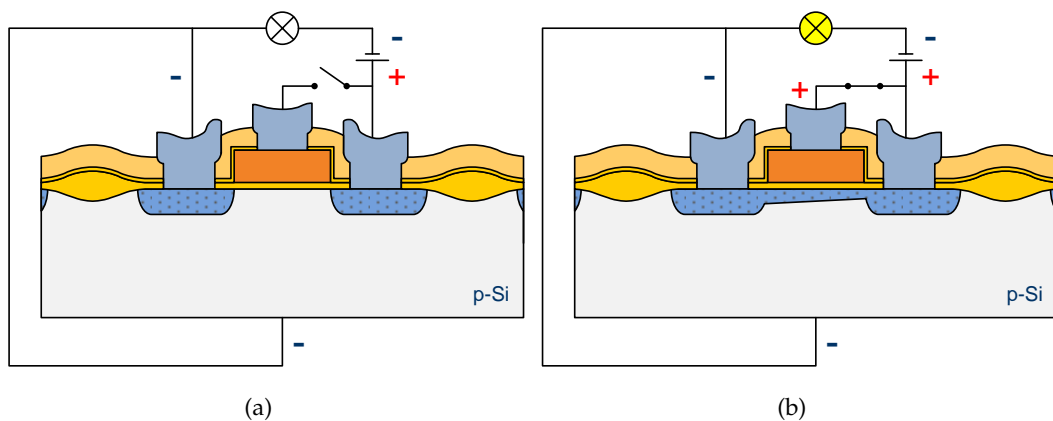


Abb. 1.19: Anreicherungs-Feldeffekttransistor

Da der Transistor den Stromfluss ohne angelegte Spannung sperrt nennt man den Transistor auch selbstsperrend.

#### Verarmungs-FET:

Durch eine leichte n-Dotierung zwischen Source und Gate erreicht man, dass ein Transistor auch ohne Gatespannung leitend ist (eine Spannung zwischen Source und Drain reicht aus). So genannte Verarmungs-FETs, oder auch selbstleitende Transistoren, sperren nur dann, wenn am Gate eine negativere Spannung als am Source-Anschluss anliegt. Dadurch werden die Elektronen, die sich unter dem Gate befinden, verdrängt – die leitende Elektronenbrücke geht verloren.

## 1.9 Aufbau eines Bipolartransistors

### 1.9.1 Allgemeiner Aufbau

Der zweite wichtige Transistortyp neben dem Feldeffekttransistor ist der Bipolartransistor. Seine Funktionsweise beruht auf beiden Ladungsträgern (**bipolar**), Elektronen und Löchern. Bipolartransistoren sind schneller als Feldeffekttransistoren, beanspruchen jedoch mehr Platz und können somit nicht so kostengünstig gefertigt werden.

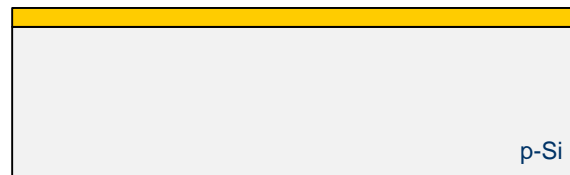
Bipolartransistoren bestehen im Wesentlichen aus zwei gegeneinander geschalteten p-n-Übergängen mit der Schichtfolge  $n-p-n$  oder  $p-n-p$ . Die Anschlüsse des Bipolartransistors werden als Emitter (E), Basis (B) und Kollektor (C) bezeichnet, Emitter und

Kollektor besitzen jeweils die gleiche Dotierungsart. Zwischen den beiden Anschlüssen befindet sich die sehr dünne Basisschicht, die dementsprechend jeweils anders dotiert ist.

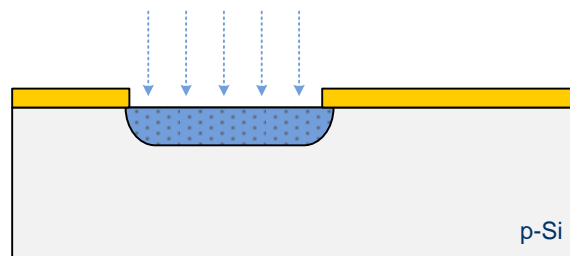
Beschrieben wird hier ein npn-Transistor in Standard Buried Collector-Bauweise (SBC, *vergrabener Kollektor*). Die Funktionsweise des pnp-Transistors ist analog dazu, die Vorzeichen der angelegten Spannung müssen lediglich vertauscht werden.

### 1.9.2 Aufbau eines npn-Bipolartransistors

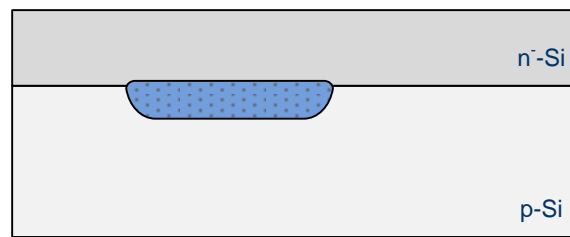
**1. Substrat:** Grundlage für einen npn-Bipolartransistor ist ein p-dotiertes Siliciumsubstrat, als Dotierstoff dient Bor. Darauf wird ein dickes Oxid (z. B. 600 nm) abgeschieden.



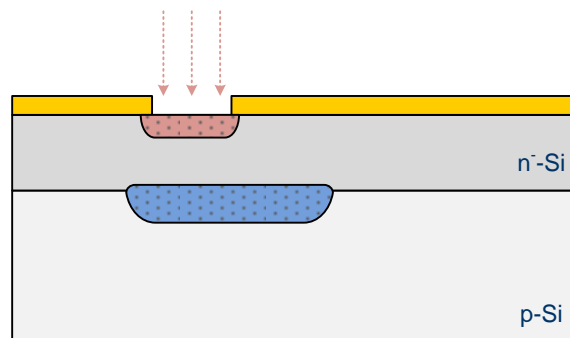
**2. Buried-Layer-Implantation:** Das Oxid dient als Implantationsmaske, als Dotierstoff wird Antimon Sb eingesetzt, da dies im Vergleich zu Phosphor bei späteren Diffusionsprozessen weniger stark diffundiert. Der stark  $n^+$ -dotierte, vergrabene Kollektor dient als niederohmige Kontaktfläche für den Kollektoranschluss.



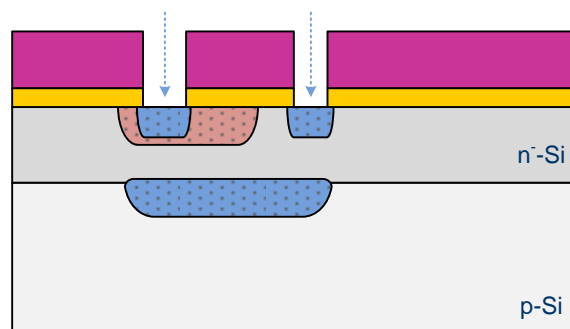
**3. Homoepitaxie:** In einem Epitaxieprozess wird eine hochohmige, schwach  $n^-$ -dotierte Kollektorschicht abgeschieden (typisch 10  $\mu\text{m}$ ).



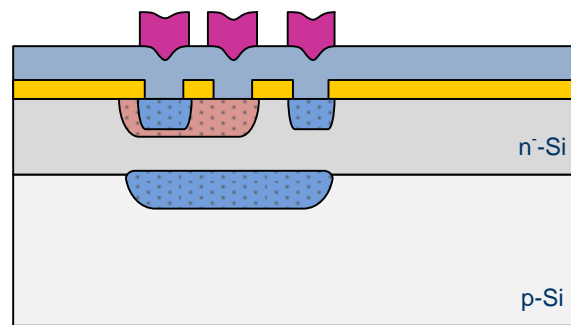
**4. Basis-Implantation:** Mit Borionen wird die p-dotierte Basis erzeugt, bei einem anschließenden Diffusionsschritt wird das Gebiet vergrößert.



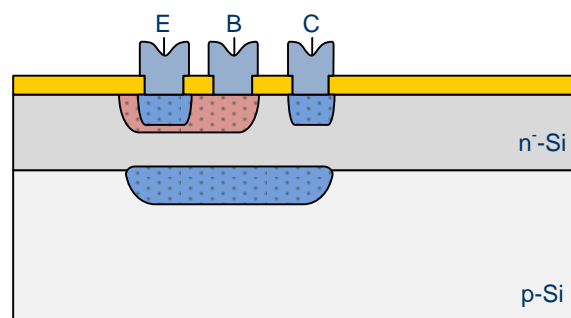
**5. Emitter- und Kollektor-Implantation:** Mit Phosphorionen werden die beiden stark  $n^+$ -dotierten Emitter- und Kollektoranschlüsse eingebracht.



**6. Metallisierung und Fototechnik:** In einem Sputterprozess wird zur Kontaktierung der drei Anschlüsse Aluminium abgeschieden und darüber eine Lackschicht strukturiert.



**7. Ätztechnik:** Abschließend werden die Anschlüsse für Emitter, Basis und Kollektor in einem anisotropen Trockenätzschritt strukturiert.



Aufgrund von Optimierungen sind Bipolartransistoren heutzutage aus mehr als drei Schichten (nnp bzw. pnp) aufgebaut. Die Kollektorzone besteht hierbei immer aus mindestens zwei unterschiedlich stark dotierten Zonen. Die Bezeichnungen nnp und pnp beziehen sich nur auf den aktiven inneren Bereich, jedoch nicht auf den tatsächlichen Aufbau.

### 1.9.3 Funktionsweise

Die beiden p-n-Übergänge werden im Folgenden als EB (Emitter-Basis) bzw. CB (Kollektor-Basis) bezeichnet. Ohne äußere Spannung bilden sich an EB und CB Raumladungszonen aus (siehe Der p-n-Übergang). Mit einer negativen Spannung am Emitter und einer positiven Spannung am Kollektor wird die Raumladungszone an EB abgebaut, an CB jedoch vergrößert. Wird an der Basis nun eine positive Spannung angelegt, so wird EB leitend – Elektronen gelangen in die Basisschicht. Da diese sehr dünn ist, können die Ladungsträger in den Kollektor injiziert werden, wo sie auf Grund der angelegten positiven Spannung abgesaugt werden. Somit fließt ein Strom von Emitter

zu Kollektor. Nahezu alle Elektronen gelangen so bereits bei einer geringen Spannung an der Basis zum Kollektor ( $> 95\%$ ), was bedeutet, dass mit einem relativ kleinen Basisstrom (Emitter zu Basis) ein sehr großer Kollektorstrom (Emitter zu Kollektor) ermöglicht wird.

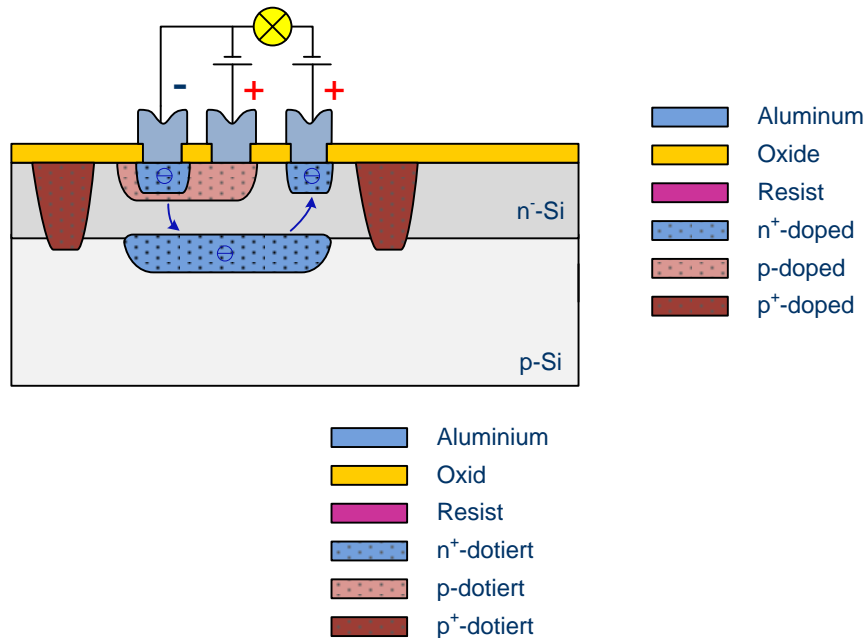


Abb. 1.20: SBC-Bipolartransistor

Die beiden tiefen  $p^+$ -dotierten Gebiete dienen zur seitlichen Isolation gegen andere Bauteile. Neben dem Transistor ist zudem ein Widerstand notwendig (nicht in Grafik), da Bipolartransistoren nicht stromlos angesteuert werden können.

## 1.10 Aufbau eines FinFET

### 1.10.1 Allgemeiner Aufbau und Funktionsweise

Der grundlegende Aufbau und die Funktionsweise eines FinFET unterscheiden sich nicht von einem herkömmlichen MOS-Feldeffekttransistor. So gibt es auch hier einen Source- und Drainanschluss, über die der Stromfluss erfolgt. Die Steuerung des Transistors regelt eine Gateelektrode. Im Gegensatz zum klassischen, in Planarbauweise hergestellten Feldeffekttransistor wird der Kanal zwischen Source und Drain jedoch

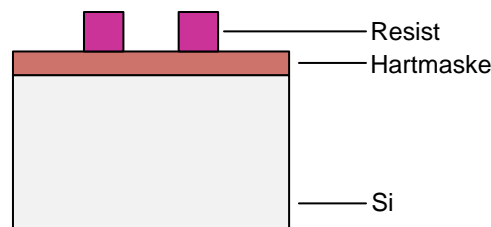
als dreidimensionale Struktur auf dem Siliciumsubstrat erzeugt, so dass die Gateelektrode diesen von mehreren Seiten umschließen kann. So wird ein wesentlich besseres elektrisches Verhalten ermöglicht: Leckströme können reduziert und Steuerströme besser kontrolliert werden.

Die dreidimensionale Struktur erzeugt jedoch auch neue parasitäre Kapazitäten und minimale Abmessungen (engl. critical dimension), die optimiert werden müssen. Die Gatelänge wird in einem FinFET parallel zum Kanal gemessen, während die Weite des Gates der doppelten Finnenhöhe plus der Finnenbreite entspricht. Die Höhe des Kanals limitiert den Steuerstrom und die Gatekapazität, die Breite beeinflusst die Durchbruchspannung und Kurzkanaleffekte und die daraus resultierenden Größen wie den Stromverbrauch.

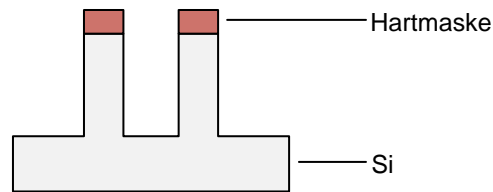
Im Folgenden wird der Aufbau eines Multigate-Transistors mit drei Gates (Tri-Gate) im Bulk-Prozess beschrieben.

### 1.10.2 Aufbau eines FinFET im Bulkprozess

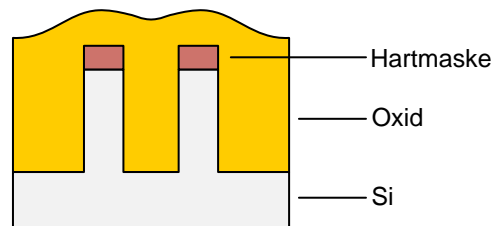
**1. Substrat:** Grundlage für einen FinFET ist ein schwach p-dotiertes Siliciumsubstrat, auf dem eine Hartmaske (z. B. Siliciumnitrid) aufgebracht und eine Lackschicht strukturiert wird.



**2. Ätzung der Finnen:** In einem stark anisotropen Trockenätzschritt werden die freistehenden Finnen in das Siliciumsubstrat geätzt. Beim Bulk-Prozess muss die Ätzung im Gegensatz zur Herstellung auf einem SOI-Substrat mit Festzeit erfolgen, da keine „Stoppschicht“ im Silicium Aufschluss über die erreichte Tiefe gibt. In einem 22-nm-Prozess liegt die Breite der Finnen bei ca. 10 – 15 nm, die Höhe sollte idealerweise dem doppelten oder mehr entsprechen.



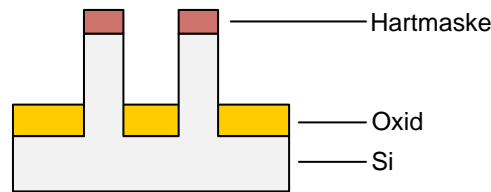
**3. Oxidabscheidung:** Zur Isolation erfolgt eine Oxidabscheidung, welche ein gutes Füllverhalten von schmalen, tiefen Gräben erlauben muss.



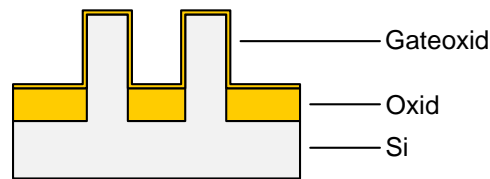
**4. Planarisierung:** Mittels chemisch mechanischem Polieren wird das Oxid eingeebnet. Die Hartmaske dient als Stoppschicht.



**5. Rückätzung:** In einem weiteren Ätzschritt mit Festzeit wird das Oxid zurückgeätzt. Zurück bleibt eine seitliche Isolation zwischen den Finnen. Da die Finnen über das Substrat in Kontakt stehen, muss ein Dotierschritt erfolgen, durch den die Siliciumstege elektrisch von einander isoliert werden (nicht dargestellt). Alternativ kann das Oxid in einem Hochtemperaturschritt in den Bodenbereich der Finnen auswachsen, so dass die Kanäle vom Siliciumsubstrat isoliert werden. Auf Grund damit verbundener komplexer Prozessschritte ist es jedoch unwahrscheinlich, dass dieser Ansatz in der Massenfertigung zum Einsatz kommen wird.



**6. Gateoxid:** Auf den Finnen wird das Gateoxid mittels thermischer Oxidation abgeschieden, um den Kanalbereich von der Gateelektrode zu isolieren.



**7. Gateabscheidung:** Abschließend wird in einem LPCVD-Prozess ein stark  $n^+$ -dotiertes Polysilicium auf den Finnen abgeschieden. Dadurch ergeben sich mehrere Gateelektroden: je eine links und rechts vom Kanal sowie - in Abhängigkeit der Dicke des Gateoxids auf den Finnen - eine dritte darüber.

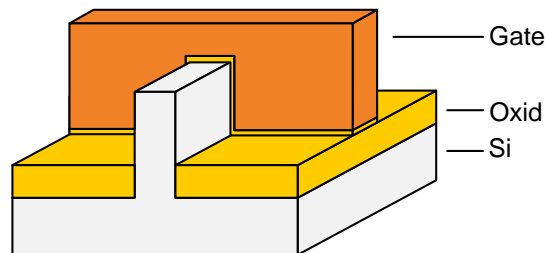


Abb. 1.21: FinFET im Bulk-Prozess

Die Einwirkung des Topgates auf den Kanal kann auch durch eine Nitridschicht zwischen Finne und Gate unterbunden werden.

Da bei einem SOI basierten Prozess bereits eine ganzflächige Oxidschicht auf dem Wafer vorhanden ist, ist die elektrische Isolation der Kanäle voneinander automatisch gegeben. Zusätzlich ist der Ätzprozess der Finnen unproblematischer, da dieser einfach auf dem Oxid gestoppt werden kann.



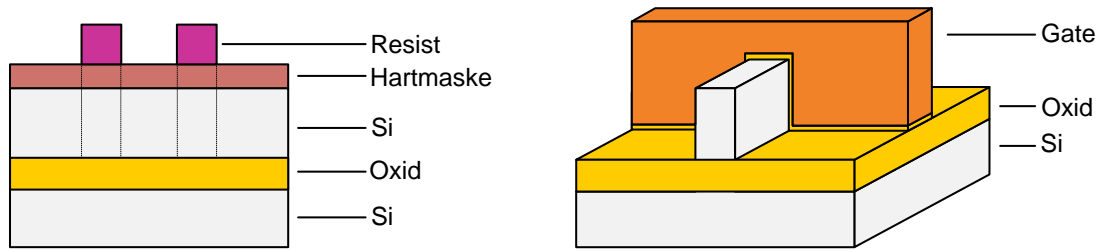


Abb. 1.22: FinFET im SOI-Prozess

