

Halbleiter - ein Stoff revolutioniert die Erde

Nichts funktioniert ohne Halbleiter, aber wie funktioniert er.

Eine Fachbereichsarbeit aus Physik
im Rahmen der Reifeprüfung Haupttermin 1995

vorgelegt von
Claudia Ringer
unter der Betreuung von
Mag. Heimo Hergan

INHALTSVERZEICHNIS

EINLEITUNG	4
1. GESCHICHTE	5
2. WAS IST EIN HALBLEITER	10
2.1 Halbleitermaterialien	10
2.2 Der ideale Halbleiter	13
2.3 Struktur der Halbleiter	14
2.4 Bändermodell	16
2.4.1 Isolator.....	18
2.4.2 Halbleiter.....	19
2.4.3 Leiter	19
2.4.4 Dotierter Halbleiter	20
3. HALBLEITERWERKSTOFFE	22
3.1 Reale Halbleiter	22
3.2 Die Eigenleitung	23
3.3 Dotieren.....	24
3.4 Die Wichtigsten Halbleiterwerkstoffe	26
4. HERSTELLUNG VON HALBLEITERWERKSTOFFEN	28
4.1 Züchtung von Einkristallen.....	28
4.2 Züchtung aus der Lösung.....	29
4.3 Kristallwachstum in der Gasphase	30
4.4 Hydrothermalsynthese	31
4.5 Kristallzüchtung aus der Schmelze.....	32
4.6 Kristallbildung durch Phasenumwandlung im festen Zustand.....	36
4.7 Zonenschmelzverfahren	36
4.7.1 Umwandlung eines polykristallinen Stabes in einen einkristallinen. 36	
4.7.2 Physikalische Reinigung von Einkristallen	37
4.8 Weiterbearbeitung der Rohhalbleiter	38
5. HERSTELLUNG VON IC'S UND VERSCHIEDENE TECHNOLOGIEN	39
5.1 Geschichte der Ic-Herstellung	39
5.2 Basistechnologien	40
5.3 MOS-Technologien.....	46
6. ABHÄNGIGKEITEN	50
6.1 Druck.....	50
6.2 Temperatur	50
6.2.1 Temperaturverhalten von Halbleitern.....	50
6.2.2 Temperaturmeßgeräte mit Halbleiterfühler	51
6.2.3 Thermistoren	52
6.3 Optische Eigenschaften.....	53

6.4 Magnetische Eigenschaften	54
7. PRINZIPIELLE FUNKTION VON HALBLEITERBAUELEMENTEN.....	56
7.1 Dioden	56
7.1.1 Grundgedanken der Dioden	56
7.1.2 Der pn - Übergang.....	57
7.1.3 Z-Dioden (Zenerdioden)	58
7.2 Optische Halbleiterelemente.....	59
7.2.1 Fotoelemente	60
7.2.2 Fotoresistor.....	60
7.2.3 Fotodiode.....	61
7.2.4 Fotozelle	62
7.2.5 Fotoarray	62
7.2.6 Solarzelle.....	63
7.2.7 Fototransistor	63
7.2.8 Lumineszenzdiode	64
7.2.9 Laserdiode	65
7.3 Transistoren.....	66
7.3.1 Die erste Generation von Transistoren	66
7.3.2 Grundlagen	68
7.3.3 Grundsaltungen	72
7.3.4 Kennlinien des Transistors.....	74
7.4 Der Feldeffekttransistor	76
7.4.1 Junction Field Effect Transistor.....	77
7.4.2 Metal - Oxid - Semiconductor - FET (MOSFET)	78
7.4.3 Die vier Arten des MOSFETs:	79
7.4.4 Kennlinien	79
7.4.5 Grundsaltungen	81
ZUSAMMENFASSUNG	83
LITERATURNACHWEIS	84

Einleitung

Seit es die Menschheit gibt, wurden immer wieder wichtige Erfindungen und Entdeckungen gemacht. Seit es die Wissenschaften gibt versuchen Menschen neue Dinge, neue Eigenschaften von Stoffen und deren Anwendbarkeit zu erforschen. Auf gleiche Weise entdeckte ein Wissenschaftler den Halbleiter, der sich in der Geschichte als eines der wichtigsten Erfindungen der Menschheit etabliert hat. Mit der neuen Technologie der Halbleiter war es möglich, bahnbrechende Apparaturen zu entwickeln, die der Menschheit viele neue Möglichkeiten eröffnet haben.

Aufgrund der militärischen Anwendungsmöglichkeit der Halbleiter wurde die Entwicklung der Halbleiter von Anfang an enorm beschleunigt.

Als wohl bekanntestes Beispiel gilt sicher der Computer, welcher erst durch die billige Herstellung von Halbleiterbauteilen für den Heimeinsatz geeignet wurde. Durch die immer wieder verfeinerten Technologien, die in Kapitel 4 aufgezeigt werden, konnte man Halbleiterbauelemente laufend verbessern und so zu einem weitgestreuten Einsatz bringen.

Für die heute am häufigsten verwendete Silizium-Technologie, sind zur Herstellung von Halbleitermaterialien genug Ressourcen in Form von Quarzsand auf der Erde vorhanden. Es besteht daher nicht die Gefahr einer Erschöpfung der Rohstoffe. Auch werden nicht nur elementare Halbleiter, sondern auch organische und Verbindungshalbleiter verwendet, die aus verschiedenen Elementen zusammengesetzt sind, wie in Kapitel 2 gezeigt wird. Für die Funktion der Halbleiter werden ihre Eigenschaften ausgenutzt, wie z.B. Leitfähigkeit, Temperaturabhängigkeit, Magnetfeldeinfluß, die in Kapitel 6 aufgezeigt werden.

Für viele ist der Begriff Halbleiter nicht sehr inhaltsvoll. Trotzdem ist dieses heutzutage schon allgegenwärtige Material aus einer modernen Welt nicht mehr wegzudenken. Fast niemanden ist bewußt, wie viele Alltagsgeräte nicht funktionieren würden, wenn es die in Kapitel 7 beschriebenen Halbleiterbauelemente nicht geben würde.

Dies soll ein Beitrag sein, um das Bewußtsein und Wissen rund um den Begriff Halbleiter und die Möglichkeiten, die sich durch seine Nutzung geben, der Allgemeinheit zugänglich zu machen. Ziel der vorliegenden Fachbereichsarbeit ist es, das Interesse am Stoff Halbleiter zu wecken und gleichzeitig einen kleinen Einstieg zu schaffen.

1. Geschichte

Seit 1729 teilt man Stoffe üblicherweise in Isolator und Leiter ein¹. Ein Jahrhundert später fand Michael Faraday² bei Silbersulfid einen negativen Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes und damit eine auffällige Eigenschaft jener Stoffklasse die man heute als Halbleiter bezeichnet.

Bald fand man neue Eigenschaften von Halbleitern: die Gleichrichtung Karl Ferdinand Braun³ 1874, die lichtelektrische Leitung Willoughby Smith 1873 und den Sperrschichtfotoeffekt Henry Becquerel im Jahre 1839.

1876 wurde von W.G. Adams und R.E. Day⁴ das erste Fotoelement, 1883 der erste Trockengleichrichter von Fritts konstruiert, und zu Beginn des 20. Jahrhunderts gelang es, mit Hilfe von Spitzendetektoren hochfrequente Ströme nachzuweisen.

Durch die Weiterentwicklung der Vakuumröhre, die zunächst günstiger produziert werden konnte, rückte zunächst die Anwendung der Halbleiter in den Hintergrund. Für bestimmte Spezialanwendungen hatte sich die neue Technologie aber bereits durchgesetzt.

Um 1905 untersuchte A.F. Joffé⁵, der "Vater der sowjetischen Halbleiterphysik", die lichtelektrische Leitung der Ionenkristalle. A.H. Willson⁶ arbeitete das Bändermodell aus, das bis heute für das Verständnis eine anschauliche Darstellung der energetischen Vorgänge im Festkörper ist.

In den Jahren 1907 bis 1912 machte K. Baedeker⁷ die Feststellung, daß Kristalle aus "Kupferjodür"⁸, die normalerweise schlecht leitend sind, eine um das 10^5 fache bessere Leitfähigkeit erzielen, wenn sie in Joddampf gehalten werden.⁹

¹ Diese Einteilung traf als erster S. Gray, vgl. dazu Ch. Weißmantel, C. Harmann, Grundlagen der Festkörperphysik. Berlin 1979, S. 432

² Vgl. ebda.

³ Der Gleichrichtereffekt wurde unter anderen an Schwefelkieskristallen nachgewiesen.

⁴ Vgl. Ch. Weißmantel, C. Harman, a.a.O., S. 432

⁵ Vgl. ebda.

⁶ Vgl. ebda.

⁷ Vgl. dazu Edgar P. Vorndran, Entwicklungsgeschichte des Computers. Berlin 1982, S. 103

⁸ "Kupferjodür" ist wahrscheinlich die alte Bezeichnung für Kupferjodid.

⁹ Der Versuch läßt sich nachvollziehen, indem man Iodkugeln, die im Handel erhältlich sind, auf einen geeigneten Halbleiterwerkstoff legt und den Widerstand mit Hilfe eines empfindlichen Meßgerätes mißt.

Mit dem Beginn der Entwicklung von Gleichrichtern und Fotoelementen aus Selen und Kupferoxiden erforschten B.J. Davydov, William Schottky und N.F. Mott als erste im Jahre 1930 den Leitungsmechanismus von Halbleitern.¹⁰

Mit systematischen Dotierungsversuchen von Germanium und Silizium versuchte man ab 1940 die Halbleiter besser zu verstehen, um so technischen Nutzen aus der Entdeckung zu ziehen.

Drei Amerikaner, John Bardeen, Walter H. Brattain und William Shockley¹¹, veröffentlichten 1948 die Erfindung des Spitzentransistors und meldeten ein US-Patent auf den gefundenen Effekt sowie auf eine Transistor-Verstärkerschaltung an.¹² Bauelemente, wie die Solarzelle (1954), der Thyristor (1956), der MOS-Transistor (1960) und der Injektionslaser (1962), folgten. 1951 war der erste Transistor im Handel erhältlich, und 1955 wurden Transistoren bereits serienmäßig in großen Stückzahlen hergestellt und lösten damit die Elektronenröhre in vielen Bereichen ab.

Transistoren ermöglichen Schalt-, Steuer-, Speicher- und Verstärkerelemente in Computeranlagen sowie auch in Fernsehern, Videorecordern und so weiter. Aufwendige Relais- und Röhrenschaltungen wurden durch funktionsgleiche Schaltungsvarianten in nun billigerer Transistorbauweise ersetzt.¹³

Einer der bedeutendsten und revolutionärsten Eingriffe war in der Geschichte der Rechenmaschinen zu erwarten. Die verbesserten Technologien der Halbleiterherstellung spiegelten sich im Leistungsvermögen der Computer. Um dies zu demonstrieren ist hier ein kurzer Abriß der Geschichte von automatischen Rechnern aufgeführt. Der Abriß soll auch Maßstab der Schnelligkeit und Datenmenge sein.

Am 19. März 1955 wurde der erste mit Transistoren bestückte Rechenautomat in den Bell Laboratories in den USA von J.H. Felker fertiggestellt.¹⁴ Der "TRANSistor-DIGital-Computer", kurz TRADIC genannt, hatte rund 800 Transistoren, 11 000 Germaniumdioden und erforderte eine Leistung von rund 100 Watt.

¹⁰ Vgl. E. P. Vorndran, a.a.O., S. 103

¹¹ Willam Shockley, geb. 13.2.1910, war ein amerikanischer Physiker, der Forschungen auf dem Gebiet der Halbleiterphysik durchgeführte und Theorien über Halbleiterdioden (Shockley'sche Gleichung) aufgestellt hat. 1956 erhielt er zusammen mit J. Bardeen und W.H. Brattain den Nobelpreis für die Erfindung des Transistors.

¹² Vgl. E.P. Vorndran, a.a.O., S. 103

¹³ Vgl. ebda., S. 105

¹⁴ Vgl. ebda.

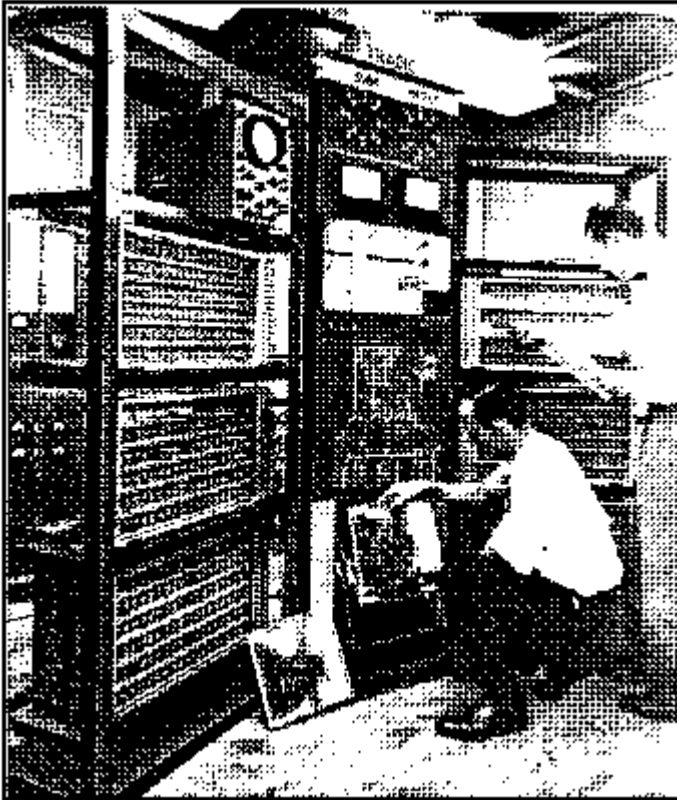


Abb. 1
TRADIC der erste Transistorrechner der Welt
(entnommen aus Edgar P. Vorndran, Entwicklungsgeschichte des Computers)

In weiterer Folge vollzog sich eine Entwicklung hin zu immer kleiner werdenden Bauelementen. Transistoren können wie Elektronenröhren als elektronische Schalter verwendet werden. Jedoch hat der Transistor gegenüber der Elektronenröhre folgende wesentliche Vorteile:¹⁵

- kleinere Abmessungen,
- geringeres Gewicht und verminderten Raumbedarf
- höhere Schaltgeschwindigkeiten
- niedrigere Betriebsspannung
- sofortige Betriebsbereitschaft nach dem Einschaltvorgang, da keine Aufheizung notwendig ist
- geringe mechanische Empfindlichkeit
- sehr geringe Störanfälligkeit
- sehr viel längere Lebensdauer (im Vergleich zur Röhre)
- besseren Wirkungsgrad, geringe Verluste und kleine Wärmeentwicklung
- einfachere Beschaltung

¹⁵ Zu diesen Vorteilen vgl. ebda.

Mit der Herstellung von Transistoren, Widerständen, Kondensatoren und Dioden als Einzelbauelemente auf Schaltkarten, begann die zweite Computergeneration.¹⁶ Diese gedruckten Schaltungen waren postkartengroße Kunststoffplatten mit Kupferleitbahnen, in deren Löcher einzelne Bauelemente hineingesteckt und rückseitig verlötet wurden.

In der zweiten Hälfte der 50er Jahre begann die Serienfertigung von elektronischen Datenverarbeitungsanlagen in Transistorbauweise.¹⁷ Eine typische Datenverarbeitungsanlage der zweiten Computergeneration ist der Siemens-Rechner "2002" (vgl. Abb. 2), der im Jahre 1957 als erster in Serie hergestellter, volltransistorbestückter Computer der Welt auf den Markt kam.¹⁸

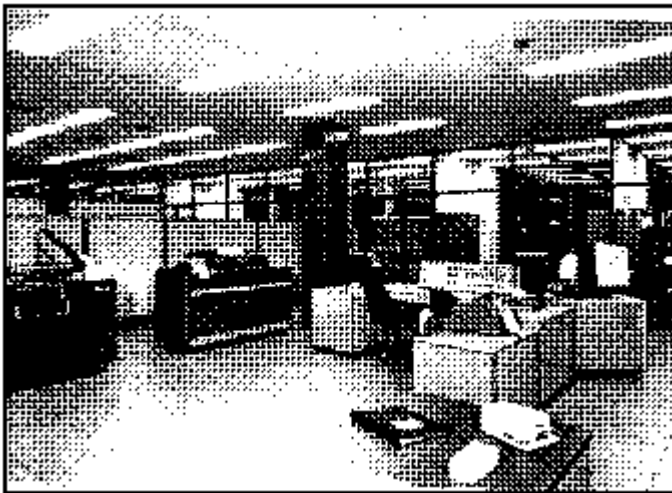


Abb. 2
Elektronische Datenverarbeitungsanlage "2002" in Transistortechnik der Firma Siemens AG
(entnommen aus Edgar P. Vorndran, Entwicklungsgeschichte des Computers)

Die dritte Computergeneration mit Transistoren in "Salzkorngröße" begann 1962.¹⁹ Die Einzelbauteile blieben erhalten, jedoch erfolgte gleichzeitig mit der Miniaturisierung eine Integration, eine Zusammenfassung von verschiedenen Bauteilen zu einer Funktionseinheit. Mehrere Transistoren, Dioden, Kondensatoren und Widerstände wurden auf Keramikplatten zu einem Modul zusammengefaßt. Eine Zusammenfassung mehrerer Module auf einer gemeinsamen Grundplatte ergibt eine Schaltkarte.

¹⁶ Vgl. ebda., S. 106

¹⁷ Vgl. ebda., S. 107

¹⁸ Vgl. ebda.

¹⁹ Vgl. ebda., S. 108

1962 wurde die sogenannte "hybride" Technik²⁰, die eine wesentliche Senkung der Herstellungskosten und eine erhöhte Leistungsfähigkeit mit sich brachte, entwickelt.

Doch bereits 1968 wurde die hybride Technik von den integrierten Schaltkreisen (IC) oder Monolith Technik abgelöst.²¹ Man baute elektronische Schaltungen jetzt nicht mehr aus Einzelbauteilen zusammen, sondern "integrierte" vielmehr die einzelnen Bauteile einer Schaltung mit Verbindungsleitungen in das innere von Siliziumkristallen. Ganze Schaltkreise auf einem einzigen Siliziumplättchen werden "Chips" genannt, diese wiederum zusammengefaßt ergeben einen Monolithbaustein. Die mikrominiaturisierte Technik ist kennzeichnend für den Entwicklungsstand der Computertechnologie bis in die Gegenwart.

²⁰ "hybride" bedeutet Mischung von zwei verschiedenen Technologien.
Unter Hybrid versteht man heute die Anordnung von mehreren Chips auf einem Träger.
Vgl. ebda.

²¹ Vgl. ebda., S. 111

2. Was ist ein Halbleiter

2.1 Halbleitermaterialien

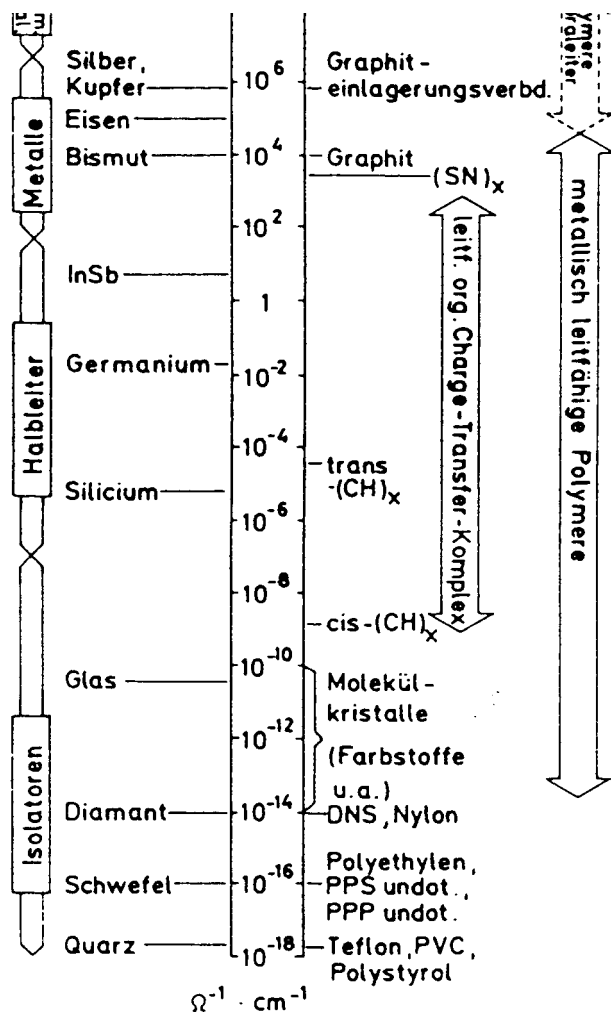


Abb. 3

Elektrische Leitfähigkeit verschiedener Materialien (strichliert: theoretisch erreichbare Werte, experimentell nicht verwirklicht) (entnommen aus ÖChemZ 1988/5, Doz. DI Dr. Franz Stelzer, DI Dr. Günther Leising, Elektrisch leitende Kunststoffe - org. Metalle)

Als wichtigste Materialeigenschaften eines Halbleiters betrachten wir hauptsächlich:

- die Leitfähigkeit (siehe Abb. 3) variiert über viele Größenordnungen und liegt vorwiegend im Bereich von $10^2 (\Omega\text{cm})^{-1}$ bis $10^{-6} (\Omega\text{cm})^{-1}$
- die Leitfähigkeit hängt stark, meist exponentiell von der Temperatur ab
- die Leitfähigkeit, die Beweglichkeit der Ladungsträger, ihre Lebensdauer und ihre Konzentration hängen von strukturellen und chemischen Störstellen ab

- die Leitfähigkeit kann sich oft sprunghaft beim Einwirken elektromagnetischer Strahlung ändern
- statische, magnetische und elektrische Felder beeinflussen den Ladungstransport
- Halbleiter können üblicherweise sogar bezüglich ein- und desselben Materials elektronenleitend (n-Typ) oder defektelektronenleitend (p-Typ) sein
- Halbleiter werden bei tiefen Temperaturen nicht supraleitend
- viele Halbleiter sind im reinen Zustand bei tiefen Temperaturen praktisch Isolatoren

Es gibt verschiedene Arten von Halbleitern. Grob werden sie in Elementhalbleiter, halbleitende Verbindungen, glasartige und organische Halbleiter eingeteilt.²² Halbleiter besitzen eine vollständig abgeschlossene Acherschale, welche der Edelgaskonstellation entspricht und für die Physik der Halbleiter wesentlich ist.

Be	B	C	N	O	F
Mg	Al	Si	P	S	Cl
Ca	Ga	Ge	As	Se	Br
Sr	In	Sn	Sb	Te	J

Abb. 4

Darstellung der Elemente des Periodensystems. Die Elemente mit halbleitenden Modifikationen sind umrahmt. (entnommen aus Ch. Weißmantel, C. Hamann, Grundlagen der Festkörperphysik)

Besonders bekannt sind die **Elementhalbleiter**, Germanium (Ge) und Silizium (Si). Zinn und Antimon sind nur bei bestimmten Kristallmodifikationen halbleitend. Phosphor, Schwefel, Selen und Jod besitzen teilweise einen molekularen Aufbau mit einem bestimmten Anteil an kovalenter und Van der Waals Bindungen²³. Bei Tellur bildet sich ein anisotropes²⁴ Kettengitter, wobei die Ketten mit schwachen Van der Waals Kräften zusammengehalten werden.

²² Vgl. Ch. Weißmantel, C. Hamann, a.a.O., S. 433

²³ "Van der Waals Bindungen" sind Bindungen, die durch Anziehungskräfte zwischen unpolaren Molekülen zustandekommen.

²⁴ "anisotrop" bedeutet, daß das Kettengitter nicht in jeder Richtung die gleichen Eigenschaften aufweist.

Verbindungshalbleiter bestehen aus zwei oder mehreren Elementen. Die erste Komponente wird mit A, die zweite mit B, eine dritte mit C usw. bezeichnet. Ist die A-Komponente dreiwertig und die B-Komponente fünfwertig, handelt es sich um eine III-V Verbindung, wie zum Beispiel Indiumantimonid oder Galliumarsenid, ist die A-Komponente zweiwertig und die B-Komponente sechswertig, so heißt es II-VI Verbindung wie, zum Beispiel Zinksulfid, Cadmiumsulfid oder Quecksilbertelurid²⁵. Bei Verbindungshalbleitern werden die einzelnen Komponenten der Reihenfolge nach mit alphabetischen Großbuchstaben und die Wertigkeit mit römischen Ziffern bezeichnet.

Sind mehrere Elemente zu einer halbleitenden Verbindung zusammengesetzt, spricht man von einem Vielkomponentensystem (siehe Abb. 5).

Grad der halbleitenden Verbindungen	Zahl der möglichen Kombinationen	real vorhandene Kombinationen	Beispiele	Beispiel für konkrete halbleitende Verbindungen
binär	21	9	$A^{III}B^V, A^{II}B^{IV}, A^I B^{VI}$ $A_2^I B_3^{VI}, A_3^I B_3^{VI}, A_2^{II} B^{VI}$	GaAs InSb, CdS
ternär	70	10	$A^I B^{III} C_2^V, A_2^I B^{IV} C_3^{VI}$ $A^{II} B^{IV} C_2^V, A_3^I B^V C_4^{VI}$	CuGaSe ₂
quaternär	105	37	$A_3^I B_{1/2}^{II} C_{1/2}^{IV} D_{1/2}^{VI}$	CuGaSe ₂ /GaAs
5komponentig	84	42	$A^{III} B^V / A^I B^{III} C_2^V / A_2^{III} B^{IV} C^{VI}$ $m / n / l - m - n$	—
6komponentig	35	21	$A_{1-x-y-z-u-v} B_x C_y D_z E_u F_v$	—
7komponentig	6	4	$A_{1-x-y-z-u-v-w} B_x C_y D_z E_u F_v G_w$	—

Abb. 5
Darstellung von Vielelektronen-Verbindungen
(entnommen aus Ch. Weißmantel, C. Hamann, Grundlagen der Festkörperphysik)

Eine neue, durchaus interessante Art von Halbleitern sind die **organischen Halbleiter** (siehe Abb. 6), die heute in der festkörperphysikalischen Forschung mehr und mehr Interesse erlangen. Ein Hauptkennzeichen solcher Halbleiter sind Kohlenstoff-Kohlenstoff Verbindungen. Diese haben regelmäßig wechselnde Einfach- und Doppelbindungen. Man nennt dies "konjugierte Struktur". Der halbleitende Zustand kommt durch die Besonderheiten des Typs der C-Verbindungen zustande und ist in ihren Einzelheiten noch nicht geklärt und somit Gegenstand der Forschung.

²⁵ Quecksilbertelurid hat eine Bandlücke, deren elektronischer Übergang blau luminesziert. Die technische Anwendung als blaue Lichtquelle ist derzeit Gegenstand der Forschung.



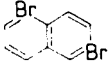
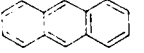
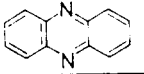
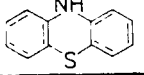
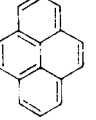
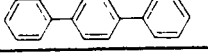
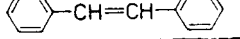
Kristall	Struktur	$\frac{\mu_n}{\text{cm}^2/\text{Vs}}$	$\frac{\mu_p}{\text{cm}^2/\text{Vs}}$
Benzen		1,5	0,2
Naphtalen		0,7	1,4
1,4-Dibrom-naphtalen		0,03	0,9
Anthracen		2,0	2,0
Phenazin		1,1	—
Phenothiazin		5	0,1
Pyren		—	0,35
p-Terphenyl		—	$3 \cdot 10^{-2}$
Stilben		—	$2 \cdot 10^{-3}$

Abb. 6
Darstellung einiger organischer Halbleiter
(entnommen aus Ch. Weißmantel, C. Hamann, Grundlagen der Festkörperphysik)

2.2 Der ideale Halbleiter

Unter einem "idealen" Halbleiter stellt man sich einen vollkommen fehlerlosen, geometrisch völlig regelmäßig angeordneten Kristallbaustein vor. In der Natur können solche Kristalle nicht entstehen. Es ist auch nicht möglich, solche perfekt reinen Kristalle herzustellen. Um physikalische Aussagen über ideale Halbleiter machen zu können, ist es notwendig hochreine Stoffe perfekter Struktur herzustellen.²⁶ Der beste reale Einkristall hat immer noch etwa 10^{13} Fehlstellen pro cm^3 .

²⁶ Zur Herstellung vgl. FBA, S. 28

2.3 Struktur der Halbleiter

Elementhalbleiter kristallisieren im Diamantgitter. Die tetraedisch angeordneten Atome sind kovalent gebunden. Die Struktur ermöglicht kürzeste Bindungsabstände zum nächsten Nachbarn. Damit ist auch die enorme Härte des Diamanten zu erklären.²⁷

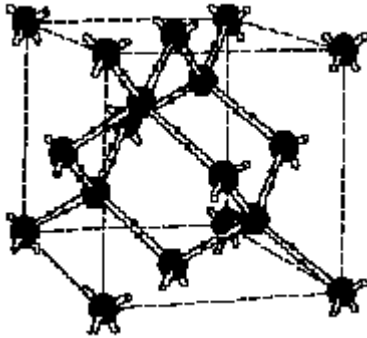


Abb. 7

Darstellung einer Elementarzelle, Diamantstruktur, (kubischflächenzentriert mit 2-atomiger Basis) (entnommen aus Erwin Böhmer, Elemente der Angewandten Elektronik)²⁸

Für **Verbindungshalbleiter** nach A_nB_{8-n} reicht die Kenntnis über nur wenige Strukturen. Die wichtigsten sind Diamantstruktur, Wurzitstruktur und Zinkblendenstruktur. Die Koordinationszahl ist vier oder sechs. Je größer n , desto größer ist auch der ionische Anteil der Halbleiter. Das dort anzutreffende Gitter ist im Extremfall ein NaCl-Gitter.

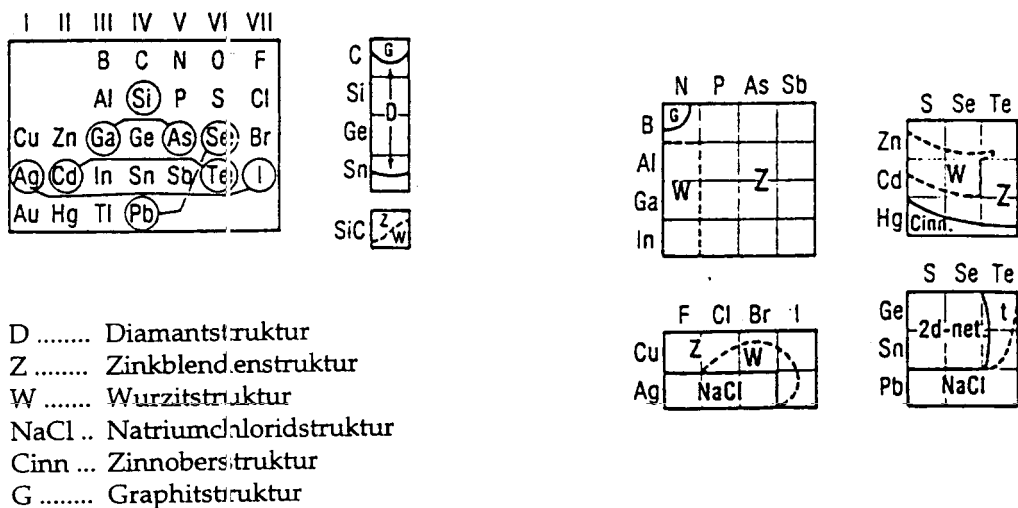


Abb. 8

Einteilung der Strukturen der wichtigsten Halbleiterfamilien

²⁷ Vgl. Ch. Weißmantel, C. Harman. a.a.O., S. 433

²⁸ Vgl. dazu Erwin Böhmer, Elemente der angewandten Elektronik. Kompendium für Ausbildung und Beruf. 4. Aufl., Braunschweig 1986

Unter **amorphen Halbleitern** versteht man einen Festkörper, in dem keine Fernordnung gegeben ist. Er ist aus kleinen Kristallen aufgebaut, die durch Korngrenzen getrennt sind. Der Strukturaufbau ist wie der von Gläsern. Diese Halbleitergläser besitzen dieselben Basis-elemente, wie sie auch für den anorganischen Halbleiter typisch sind, nur daß hier der Festkörper ganz oder vorherrschend eine amorphe Struktur hat. Bekannte Halbleitergläser sind zum Beispiel Verbindungen aus As/Te/Si/Ge oder As/Te/Ga/Ge.²⁹

Anders als beim einkristallinen Halbleiter können bei amorphen Halbleitern sowohl Elektronen als auch Löcher zum Stromfluß beitragen. Durch die ungeordnete Struktur sind die Ladungsträger sehr stark gestreut. Amorphe Halbleiter werden in unterschiedliche Klassen eingeteilt. Diese Stoffe sind zur Zeit zentrales Thema in der aktuellen Forschung. Die beiden wichtigsten sind die **tetraedrisch gebundenen amorphen Festkörper**, wie Silizium und Germanium, und die **Chalkogenidgläser**³⁰.

Die tetraedisch gebundenen Materialien sind, an ihren Eigenschaften gemessen, ähnlich den kristallinen Modifikationen. Sie können mit geringen Mengen chemischer Verunreinigungen dotiert werden, und ihre Leitfähigkeit kann durch frei werdende Ladungsträger verändert werden. Im Gegensatz dazu sind Chalkogenidgläser gegen solche Ladungsträgerinjektionen unempfindlich.

Amorphe Halbleiter werden als dünne Filme durch Aufdampfen, Sputtern³¹ oder als Keramik³² hergestellt, wobei keramische Halbleiter gegenüber einkristallinem Silizium den wesentlichen Vorteil besitzen, daß sie billiger sind. Für die Herstellung sind "Rezepte" maßgeblich.

Versuche, reines amorphes Silizium herzustellen, schlugen jedoch fehl. Dennoch kann man durch Einbringen von bis zu 10% Wasserstoff die Strukturfehler zu einem beachtlichen Anteil reduzieren. Das Verständnis dieser Stoffklasse hält noch viele physikalische Geheimnisse verborgen.³³

²⁹ Vgl. Ch. Weißmantel, C. Harman, a.a.O., S. 434

³⁰ Chalkogenidgläser sind Festkörper deren eine Komponenten, Chalkogenide, Elemente der sechsten Hauptgruppe, wie Selen, Schwefel oder Tellur sind. Sie sind 6-2 Halbleiter, vgl. dazu FBA, S.12

³¹ "Sputtern" bedeutet Abtragung von Oberflächenatomen durch Teilchenbeschuß.

³² Als "Keramik" werden gepreßte und gebrannte Oxide bezeichnet.

³³ Vgl. dazu Charles Kittel, Einführung in die Festkörperphysik. München 1989, S. 567

2.4 Bändermodell

Die elektronischen und elektrischen Halbleitereigenschaften kann man mit Hilfe des Bändermodells von A.H. Wilson³⁴ verstehen. Hierbei handelt es sich um ein Energieschema, welches die einzelnen Energiezustände der Elektronen in Form von Bändern darstellt. Dieses Bandschema besteht je nach Anzahl der Schalen des Atoms aus mehreren Bändern. Für die Eigenschaften sind jedoch nur die drei "Standardbänder" von Bedeutung. Das unterste besetzte Band ist das **Leitungsband**, das darüberliegende Band ist das **Valenzband**. Dazwischen befindet sich das **Verbotene Band**, in dem keine Energiezustände erlaubt sind.

Das Verbotene Band oder Bandlücke ist die Energiedifferenz zwischen dem niedrigsten Punkt des Leitungsbandes, der sogenannten Leitungsbandkante, und dem höchsten Punkt des Valenzbandes, der Valenzbandkante.³⁵

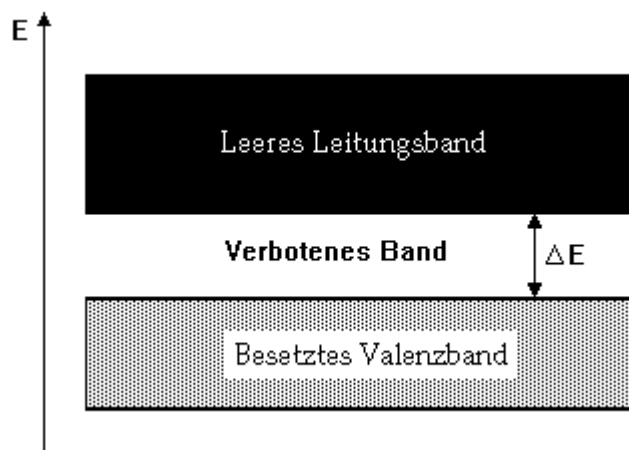


Abb. 9

Darstellung des Bandschemas, wobei die Energie E auf der Abszisse aufgetragen ist und ΔE die Energiedifferenz zwischen Valenz- und Leitungsband ist. (entnommen aus C. Kittel, Einführung in die Festkörperphysik)

Zum besseren Verständnis stellt man sich ein Atom vor. Es besteht aus einem Kern und Elektronen, die aufgrund der elektromagnetischen Anziehungskräfte an den Atomkern gebunden sind. Wird dem Atom Energie zugeführt, die größer ist als die Energielücke zwischen zwei erlaubten Zuständen, so kann das Elektron in den nächst höheren Zustand springen (siehe Abb. 10). Spektroskopische Experimente³⁶ beweisen die Anregung des Atoms bei bestimmten quantisierten Energien. Dieses Elektron bleibt zunächst

³⁴ Vgl. dazu FBA, S. 5

³⁵ Vgl. dazu Herbert Freyhardt, Franz Ulrich Hildebrecht u.a., Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik. Band 6, Festkörper. Berlin, New York 1992, S. 42

³⁶ "Spektroskopische Experimente" sind selektive Anregungen von Atom- oder Molekülneveaus.

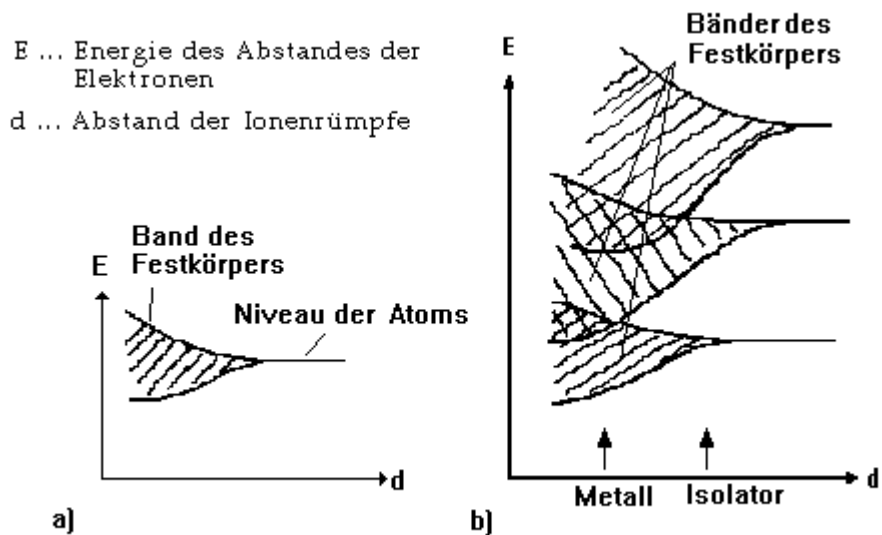


Abb. 12
a) Darstellung eines Komplexes von Elektronen in einem Energieniveauschema
b) Darstellung von mehreren Komplexen von Elektronen bei denen es zur Überlappung kommt

2.4.1 Isolator

Bei Nichtleitern ist es zwar möglich, durch eine Energiezufuhr ΔE Elektronen ins Leitungsband zu bringen. Dieser Vorgang ist selten, und das Elektron wird durch die große Anziehung des Atomkerns wieder eingefangen - es kann nicht transportiert werden, es ist lokalisiert. Der Strom kann in solchen Stoffen nicht fließen.

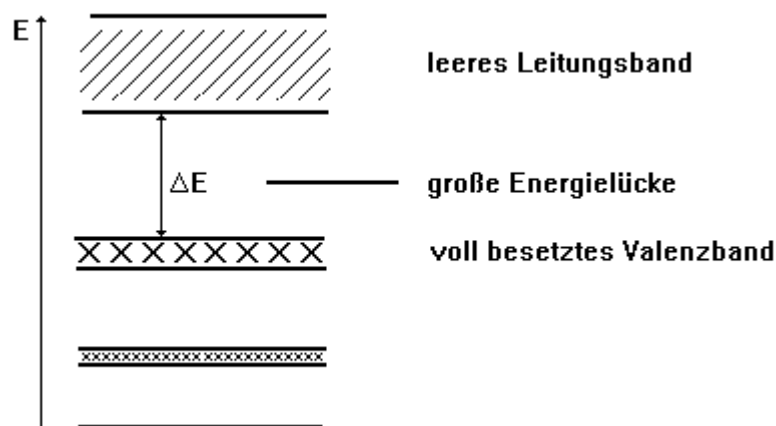


Abb. 13
Darstellung des Bandschemas bei Isolatoren
Hier und in den folgenden Abbildungen über die Bandstrukturen ist nur das unterste leere (Leitungsband) und das oberste volle (Valenzband) bzw. die Energielücke wichtig, die anderen noch gezeichneten Bänder sollen darstellen, daß es nicht nur diese drei gibt. Senkrecht ist, wie bei Bandschemata üblich, die Energie E aufgetragen, welche in den folgen Abbildungen aus Gründen der Übersicht weggelassen werden.

2.4.2 Halbleiter

Bei Halbleitern ist die Energielücke (siehe Abb. 14) zwischen Valenzband und Leitungsband kleiner als bei Isolatoren. Daher brauchen die Elektronen des Halbleiters weniger Energie, um diesen Sprung machen zu können. Aufgrund der Raumtemperatur besitzen die Elektronen eine mittlere Energie von etwa 3 eV³⁷. Als Halbleiter bezeichnet man nun jene Stoffe, deren Bandlücke durch diese Elektronen überwunden werden. Es sind sozusagen Isolatoren, die auf Grund der Raumtemperatur von ca. 300 K, was der Elektronenenergie von 3 eV entspricht, gerade zu leiten beginnen.³⁸

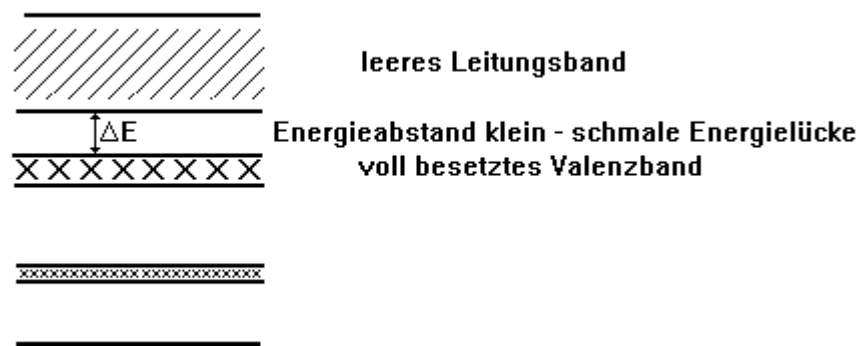


Abb. 14
Darstellung des Bandschemas bei Halbleitern

2.4.3 Leiter

Bei Leitern (siehe Abb. 15) ist das Valenzband bereits voll und das Leitungsband halb besetzt. Daher sind frei bewegliche Elektronen vorhanden, und dies führt zur Leitfähigkeit von Metallen. Zusätzlich kann das Leitungsband mit einem anderen Band überlappen wie z.B. bei Kupfer. Dadurch ist die Beweglichkeit der Elektronen zusätzlich erhöht. Diese Zwei-Elektronen-Metalle sind meist besonders gute Leiter.

³⁷ "eV" ist die Abkürzung für Elektronenvolt.

³⁸ Vgl. Herbert Freyhardt, Franz Ulrich Hillebrecht u.a., a.a.O., S. 46

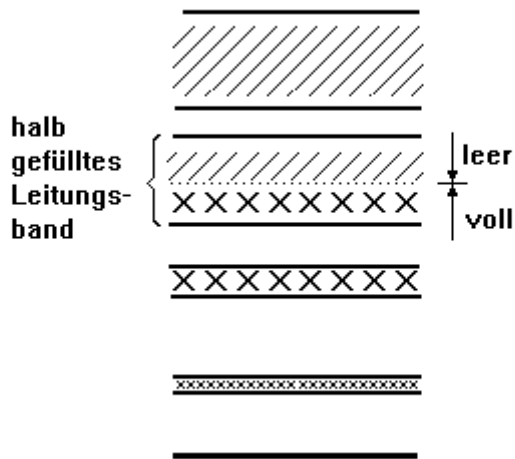


Abb. 15
Darstellung des Bandschemas bei einem Leiter

2.4.4 Dotierter Halbleiter

Die Aufgabe der Störstellen beim Halbleiter ist nun, den Abstand zwischen Valenzband und Leitungsband zu verringern. Die Donatoren des n-Leiters liegen energetisch knapp unter dem Leitungsband und überbrücken das Energieniveau so, daß das Elektron leichter ins Leitungsband angehoben werden kann.

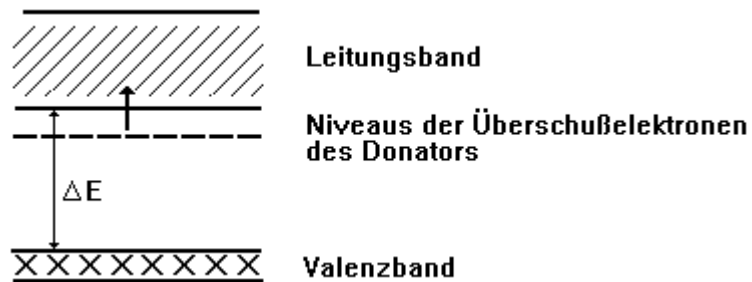


Abb. 16
Darstellung des Bandschemas bei n-dotierten Halbleitern
Durch die Überschüsselektronen des Donators wird ein sogenanntes Fünfelektronenband gebildet, welches nun die Elektronen (wie sonst das Valenzband) ins Leitungsband abgibt und zur Leitung beiträgt.

Die Akzeptoren des p-Leiters liegen knapp über dem Valenzband und können durch den in ihnen herrschenden Elektronenmangel Elektronen aus dem Valenzband einfangen. Dadurch kann ebenfalls die Bandlücke überbrückt werden.

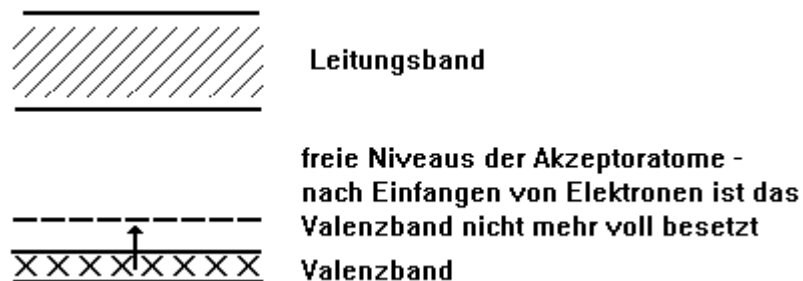


Abb. 17

Darstellung des Bandschemas bei n-dotierten Halbleitern

Hierbei bilden die Löcher des Akzeptors ein Band über dem Valenzband und nehmen vom Valenzband Elektronen auf, welche dann leichter ins Leitungsband gehoben werden können.

3. Halbleiterwerkstoffe

3.1 Reale Halbleiter

Der "reale" Halbleiterkristall weist eine Vielzahl von Gitterfehlern auf. Diese werden nach der Dimensionalität der Fehler unterschieden. Als **lokalisierte Fehler** (eindimensionale Gitterfehler) oder **Punktdefekte** werden Fremdatome, Leerstellen oder Zwischengitteratome bezeichnet.

Zu den **nicht lokalisierten Fehlern** (zweidimensionale Fehler) oder **Gitterversetzungen** gehören Stufen- und Schraubenversetzungen.

Dreidimensionale Defekte sind Bubbles und Agglomerationen von eindimensionalen Defekten.³⁹

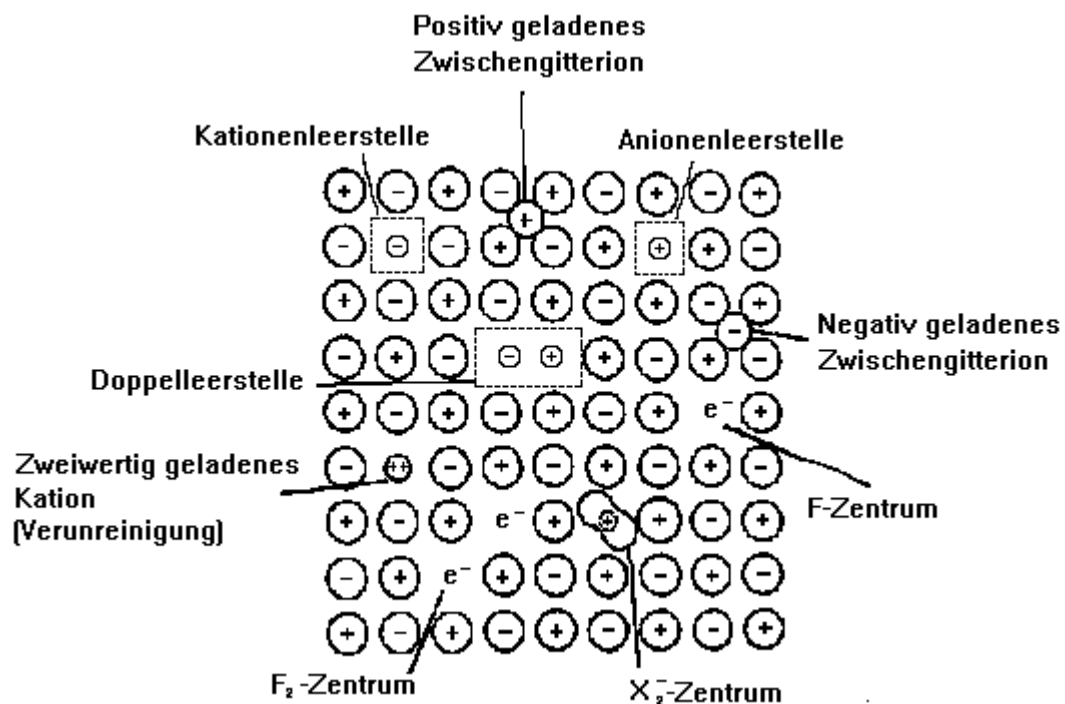


Abb. 18

Schematisch zweidimensionale Darstellung der wichtigsten Gitterbaufehler (entnommen aus dem Vorlesungsskriptum "Nukleare Festkörperphysik" von Uni.Prof. Dr. Werner Puff, Sommersemester 1994)

³⁹ Vgl. ebda., S. 297

3.2 Die Eigenleitung

Von Eigenleitung spricht man, wenn ein Stoff idealisiert in völlig reiner und ungestörter Form vorliegt. Bei tiefen Temperaturen sind alle Elektronen fest im Kristallgitter gebunden und zeigen daher so gut wie keine Leitfähigkeit (siehe Abb. 19).⁴⁰

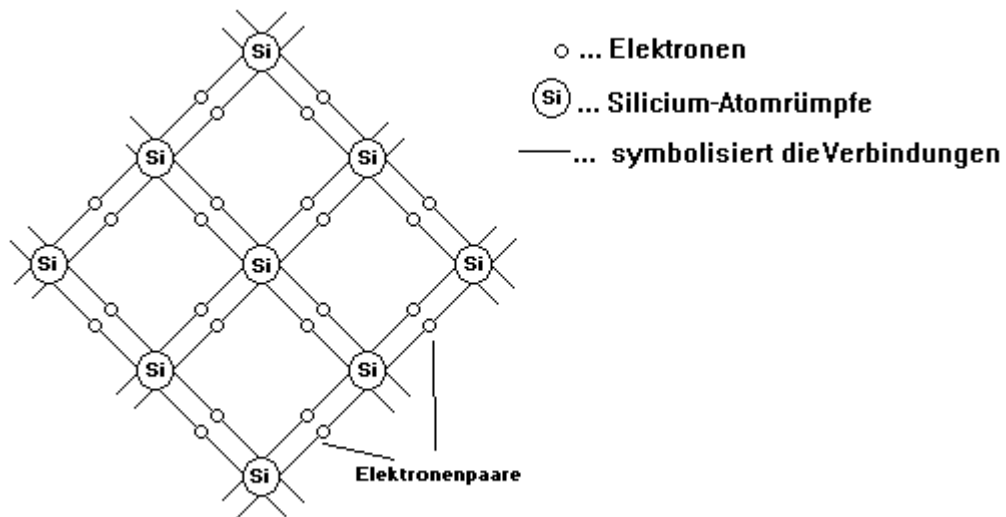


Abb. 19
Schematische zweidimensionale Darstellung eines Si-Kristalls bei 0 K

Wenn nun die Temperatur steigt (siehe Abb. 20), nimmt die thermische Bewegung der Atomrümpfe zu, und es kann sein, daß sich manche Elektronen aus ihren Bindungen lösen.

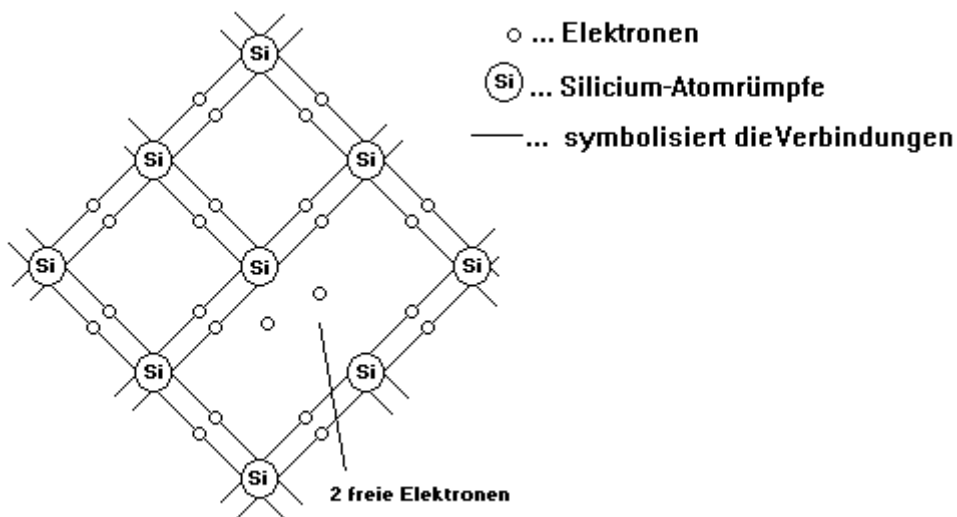


Abb. 20
Si-Kristall bei Erwärmung

⁴⁰ Vgl. dazu Fritz Heywang, Erwin Nücke, Jochen Timm, Walter Timm, Physik für Techniker. 18. Aufl, Hamburg 1986, S. 296

Dann können sich die Elektronen so lange frei im Kristall bewegen, bis sie wieder von anderen Atomrümpfen eingefangen werden, bei denen ein Platz frei geworden ist. Wenn dies geschieht, geht wieder ein Ladungsträgerpaar verloren, gleichzeitig aber wird eine Energiemenge in Form von Wärme oder Licht frei. Man nennt diesen Vorgang auch Rekombination, was soviel heißt wie das Lösen und wieder Zusammenführen von Elektronen und Löchern in einem Kristall. Paarbindung und Rekombination sind Vorgänge, die in einem Halbleiter ununterbrochen ablaufen und sich das Gleichgewicht halten, sie sind dynamisch. Da die Ladungsträger hierbei von den Atomen des Halbleiters herrühren, spricht man bei der dadurch entstehenden Leitfähigkeit von Eigenleitfähigkeit. Diese durch thermische Bewegung gelösten Elektronen verursachen eine Leitfähigkeit in solchen Kristallen, die mit steigender Temperatur zunimmt. Die im Gleichgewichtszustand vorhandene Zahl von Elektronen und Löchern ist eine Materialkonstante und ausschließlich von der Temperatur abhängig.

Eine Eigenschaft der Eigenleitung ist es, daß die Größe der Leitfähigkeit hauptsächlich von der Zahl der Ladungsträger abhängt, aber auch von der Beweglichkeit der Elektronen. Die Beweglichkeit der Elektronen ist im wesentlichen durch die Zahl der Zusammenstöße mit dem Gitter bestimmt, die Löcherbeweglichkeit durch die Platzwechsel in den Bindungen. Mit steigender Temperatur nimmt die Paarerzeugungsrate und die Rekombinationsrate rasch zu, wobei sich immer ein dynamisches Gleichgewicht einstellt.

3.3 Dotieren

Die bestimmte Leitfähigkeit von Halbleitern läßt sich wesentlich erhöhen, wenn man sie mit Fremdatomen "verunreinigt". Die Fremdatome besitzen entweder ein Elektron mehr, sind also fünfwertig, dann heißen sie Donator, oder ein Elektron weniger, sind dreiwertig und heißen Akzeptor. Man nennt die jeweils in der Überzahl vorhandenen Ladungsträger Majoritäts- und die in der Minderheit vorhandenen Minoritätsträger.

Wenn man nun einen Halbleiter mit Donatoren dotiert, so entsteht eine Störstelle, bei der dieses Valenzelektron überzählig wird. Es löst sich infolge thermischer Energie aus seiner Bindung und wird zu einem frei beweglichen Leitungselektron. Da es sich um Störstellen im Kristall handelt, nennt man diese Leitfähigkeit **Störstellenleitfähigkeit**. Sie ist größer als die Eigenleitfähigkeit, da die

Elektronen leichter gebunden sind, die Eigenleitung ist zwar noch vorhanden, wird aber durch die Störstellenleitfähigkeit überdeckt. Einen Halbleiter, dessen Leitung auf beweglichen Elektronen, also auf negativen Ladungsträgern, beruht, nennt man n- Halbleiter.⁴¹

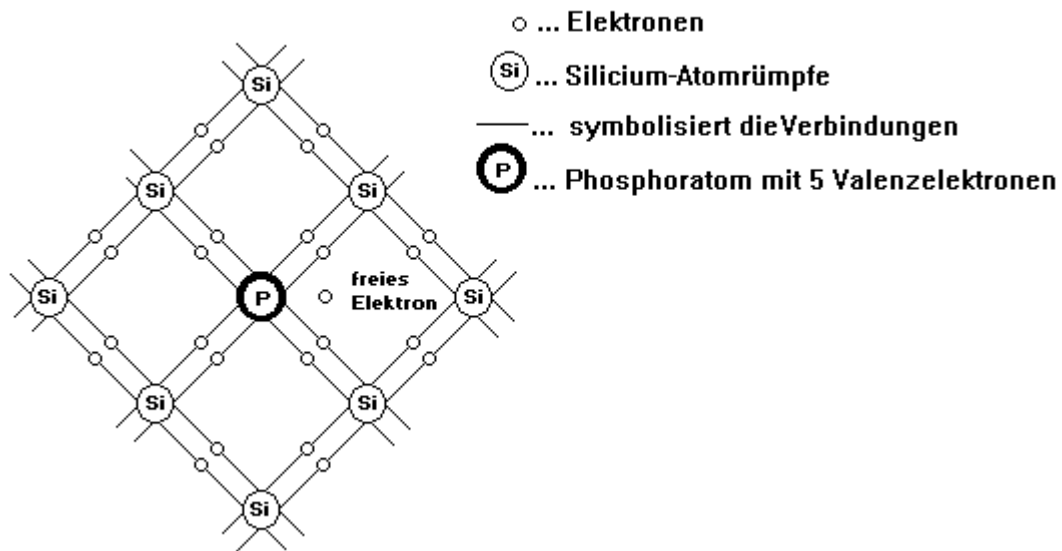


Abb. 21
 Si-Kristall mit Phosphor Dotierung, n-Leiter

Eine ähnliche Wirkung⁴² erzielt man, wenn ein Halbleiterkristall mit einem Akzeptor dotiert wird. Er hat ein Elektron zu wenig, und beim Einbau solcher Atome in das Kristallgitter des Halbleiters entstehen Störstellen in Form von Löchern. Ein Loch ist ein Atomrumpf, dem ein Elektron fehlt, es hat daher eine positive Ladung. Diese ist scheinbar beweglich (siehe Abb. 23), weil der Elektronenmangel durch eine Nachbarbindung aufgefüllt werden kann. Es macht den Eindruck, als ob das Loch nach rechts und die Elektronen nach links wandern. Man nennt diese Leitfähigkeit **Löcherleitung**. Da ein Loch gleich wie eine positive Ladung dargestellt werden kann, nennt man einen solchen Kristall p-Halbleiter (siehe Abb. 22).⁴³

⁴¹ Vgl. dazu Josef Safarik, Josef Vojta, Ottokar Radkorsky, Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik. 5. Aulf., Wien 1972, S. 128 und

Fritz Heywang, Erwin Nücke, Jochen Timm, Walter Timm, a.a.O., S. 296

⁴² Vgl. dazu Bändermodell FBA, S. 20

⁴³ Vgl. Josef Safarik, Josef Vojta, Ottokar Radkorsky, a.a.O., S. 128 und Fritz Heywang, Erwin Nücke, Jochen Timm, Walter Timm, a.a.O., S. 296

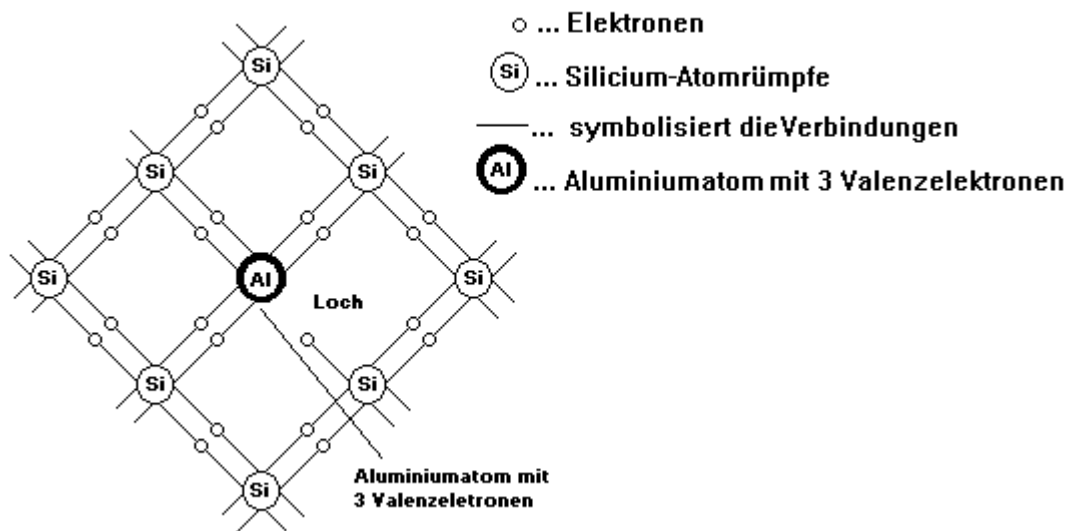


Abb. 22
 Si-Kristall mit Aluminium Dotierung, p-Leiter

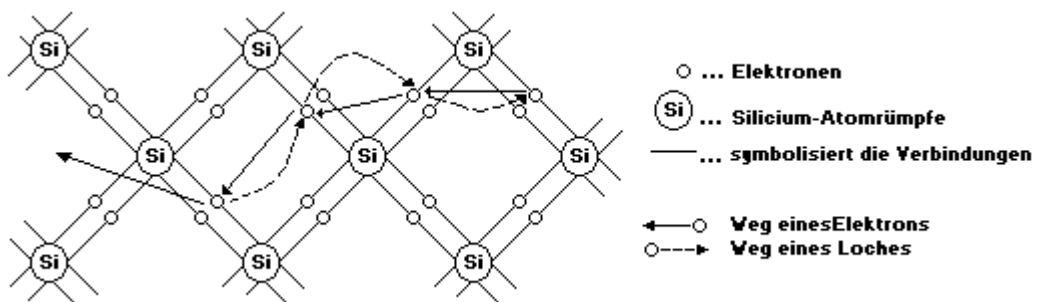


Abb. 23
 Schematische zweidimensionale Darstellung der Bewegung von Elektronen und Löchern und die Entstehung der Leitfähigkeit in einem Kristall

3.4 Die Wichtigsten Halbleiterwerkstoffe

Zu den wohl wichtigsten Halbleiterwerkstoffen gehören sicher die beiden Elementarhalbleiter Silizium und Germanium. Sie besitzen aus Gründen, die hier zu erklären den Rahmen der Arbeit sprengen würde, eine hohe Lebensdauer des angeregten Zustandes und eine hohe Beweglichkeit. Dies wirkt sich dahingehend aus, daß die Schaltgeschwindigkeit und Strommenge nur von der Verlustleistung an physikalischen Grenze stößt (Pentium Prozessoren). Nachteilig ist, daß die optischen Eigenschaften z.B. der LED aus Silizium nicht möglich sind. Noch ein Vorzug von Silizium ist, daß nicht leicht eine Knappheit entsteht, da der Rohstoff natürlich SiO_2 , also Quarz vorhanden ist. Quarz ist zu etwa 70 % in der Erdkruste enthalten.

Für Germanium benötigt man eine andere Methode der Herstellung, die aus Gründen der Produktionsmenge und Entwicklung dem Silizium nachsteht, obwohl die ersten Bauteile vorwiegend aus Germanium gefertigt waren. Germanium hat aufgrund der gleichen Struktur auch dieselben Eigenschaften und daher dieselben Vor- und Nachteile wie dieses. Zu erwähnen ist noch für den praktischen Gebrauch, daß die maximale Temperatur nur etwa 75°C sein darf, bei Silizium hingegen 150°C .

Der dritte oft gebrauchte Stoff mit dem hauptsächlich LED und Hochfrequenzbauteile gebaut werden ist GaAs. Dies ist derzeit der billigste Halbleiter, der diese Fähigkeit besitzt. Durch verschiedenes Dotieren kann man die Farbe des emittierten Lichtes verändern. GaAs eignet sich auch ideal für Mikrowellenelektronik und Satellitenempfänger.

Die Forschung ist natürlich auch an speziellen Effekten, abstrusen Eigenschaften und deren Anwendung interessiert. Auch ist es ein Ziel, die Computer immer schneller zu machen. Um diesem Streben nachzukommen, gibt es zahlreiche Forschungsprojekte mit Silizium-Germanium-Mischhalbleitern und anderen weniger bekannten Halbleiterstoffen. Auch werden dünne Schichten von Halbleitern untersucht, deren Eigenschaften oft von den herkömmlichen Halbleitern verschieden sind. Dabei treten interessante Effekte auf. Für die Herstellung von Temperatursensoren sei noch erwähnt, daß hier Metalloxide in verschiedener Zusammensetzung verwendet werden, daß die Energielücke der eines Halbleiters entspricht.

4. Herstellung von Halbleiterwerkstoffen

4.1 Züchtung von Einkristallen

Für die festkörperphysikalische Forschung sind saubere oder auch definiert verunreinigte Einkristalle notwendig. Auch benötigt man für die industrielle Züchtung von Halbleitern möglichst reine Impfkristalle. Die Mehrheit aller grundlegenden Erkenntnisse über die Eigenschaften der meisten polykristallinen Werkstoffe wurde erst durch das Studium von einkristallinen Proben gewonnen. Da sich in der Natur nur wenige Stoffe in einkristalliner Form bilden, wurde infolgedessen die Herstellung von Einkristallen, die Kristallzüchtung, immer bedeutender. Die im Labor unter großem Aufwand gezüchteten einige mm großen Kristalle, sind in der heutigen Zeit zu einem wesentlichen Wirtschaftsfaktor mit riesigen Produktionsmengen geworden.

Da der Einsatz von einkristallinen Werkstoffen zunahm, entwickelte sich die Herstellung von Einkristallen von einer Kunstfertigkeit zu einer produktionsmäßigen Technologie, wie z.B.: Turbinen aus einem Einkristall, denn sie sind beständiger als herkömmliche. Der neueste Stand der Züchtung liegt in Weltraumlaboratorien, in denen unter Bedingungen der Schwerelosigkeit besonders reine und perfekte Einkristalle gezogen worden sind.

Zur Züchtung von Einkristallen haben sich folgende Varianten durchgesetzt:⁴⁴

- Züchtung aus der Lösung
- Kristallwachstum aus der Gasphase
- Hydrothermalsynthese
- Kristallzüchtung aus der Schmelze
- Kristallbildung durch Phasenumwandlung im festen Zustand

Für die großindustrielle Anwendung steht das Züchten aus der Schmelze im Vordergrund.

⁴⁴ Vgl. Ch. Weißmantel, C. Hamann, a.a.O., S.100

Dabei unterscheidet man folgende Verfahren:⁴⁵

- Czochralski - Verfahren
- Verneuil - Verfahren
- Verfahren nach Nacken und Kyropoulos
- Methode nach Bridgman
- Methode nach Stockbarger

Bei den einzelnen Verfahren gibt es jedoch immer noch große Probleme, wie das Dampfdruckproblem, das Tiegelproblem und die Toxizität. Viele Stoffe, die bei der Herstellung von Einkristallen benötigt werden, sind toxisch, und daher muß beim Umgang mit ihnen auf besondere Sicherheitsmaßnahmen geachtet werden.

Ein wichtiger und sicherlich optimierbarer, aber auch vermeidbarer Punkt ist das Tiegelproblem. Bei jedem Schmelzvorgang in einem Tiegel gelangen durch die hohen Temperaturen geringe Stoffteile des Tiegels in die Schmelze und tragen damit zur Verunreinigung des späteren Einkristalles bei.

Ist der Dampfdruck der Komponenten des Halbleiters verschieden, so kann die Herstellung nicht unter beliebigen Bedingungen erfolgen, da sonst die stöchiometrische Reinheit des Kristalls durch Abdampfen einer Komponente gefährdet wäre. In diesem Zusammenhang spricht man vom Dampfdruckproblem.

4.2 Züchtung aus der Lösung

“Bei diesem Verfahren hängt man einen kleinen “Impfkristall” an einem Seil in eine gesättigte Lösung des abzuschneidenden Stoffes. Bei langsamem Verdunsten oder allmählicher Abkühlung des Lösungsmittels und gleichbleibenden Versuchsbedingungen (Erschütterungsfreiheit, Temperatur, Reinheit) scheidet sich das gelöste Material ausschließlich am Impfkristall ab, ohne daß neue Kristallkeime gebildet werden. Von vielen Salzen können auf diese Weise aus wäßriger Lösung schöne große Kristalle hergestellt werden. Nachteilig ist jedoch, daß die Kristalle durch Eischlüsse von Lösungsmittel verunreinigt werden. Organische Stoffe lassen sich aus geeigneten Lösungsmitteln ab-scheiden, und für Kristalle von halbleitenden Verbindungen wird die Züchtung aus Lösungen in geschmolzenen Metallen benutzt.”⁴⁶

⁴⁵ Vgl. ebda., S. 103

⁴⁶ ebda., S. 101

4.3 Kristallwachstum in der Gasphase

Die Bildung von Kristallen in der Gasphase⁴⁷ geht folgendermaßen vor sich, entweder durch Kondensation des verdampften Materials oder durch chemische Reaktion zwischen gasförmigen beziehungsweise flüchtigen Ausgangsverbindungen. Normal werden, da der Gasraum nur sehr klein ist und immer nur eine kleine Stoffmenge darin Platz hat, nur sehr kleine Kristalle erzeugt. Wenn man nun einen besonders großen Kristall züchten will muß man darauf achten, daß über längere Zeit ein kontinuierlicher Gasstrom zum Abscheidungsort unter möglichst konstanten Bedingungen gelangen kann, um auf diese Weise für einen ständigen Nachschub von "Nährlösung" zu sorgen.

Man unterscheidet je nach experimenteller Durchführung ein geschlossenes und offenes System (siehe Abb. 24). Bei ersterem handelt es sich um eine abgeschmolzene Ampulle, in der sich das feste polykristalline Ausgangsmaterial befindet. Diese Ampulle ist meist aus Quarz angefertigt, da Quarz sehr temperaturbeständig ist. Mit einem Zweizonenofen wird mit Hilfe einer elektrischen Heizung ein Temperaturgefälle erzeugt, sodaß an einem Rohrende ständig Material verdampft und sich am anderen kühleren Ende in fester Form abscheidet. Viele Stoffe bilden dabei Keime die sich zufällig an der Rohrwand verteilen und dann zu 3 bis 20 mm großen Kristallen heranwachsen. Um einen einzelnen großen Kristall zu gewinnen, bringt man einen Impfkeim an der Abschmelzzone an und regelt die Temperatur so, daß sich ein Kristall bilden kann, nicht aber Kristallkeime.

Bei offenen Reaktionssystemen wird ein Trägergas eventuell mit Zusatz von reaktiven Komponenten bei normalem Druck durch die Apparatur gepumpt.

Wenn die Nährlösung durch Sublimation oder chemischen Transport gebildet wird, genügt es, den Gasstrom bei geeigneter Temperatur und konstanter Strömungsgeschwindigkeit über ein Ausgangsmaterial zu leiten. Wenn aber gasförmige Verbindungen der Komponenten vorhanden sind, müssen diese über spezielle Dosiersysteme dem Gasstrom zugeführt werden.

Ein wichtiger Begriff ist der "lineare Wachstumsfaktor". Darunter versteht man das Dickenwachstum einer Kristallfläche senkrecht zur Oberfläche in mm pro Zeiteinheit.⁴⁸

⁴⁷ Vgl. ebda.

⁴⁸ Vgl. ebda., S. 103

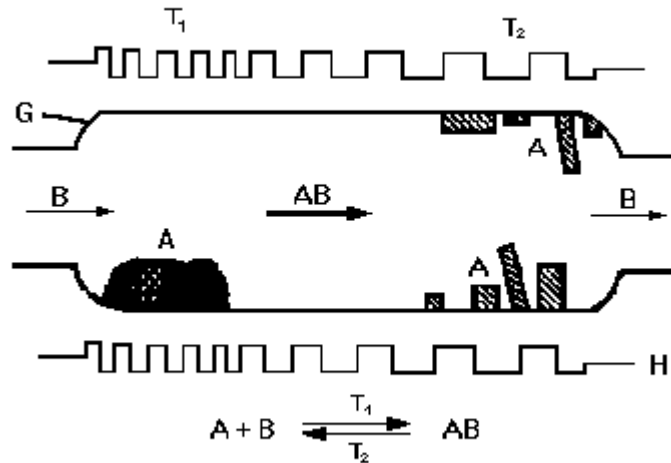


Abb. 24
 Darstellung der Kristallzuchtung aus der Gasphase, offenes System
 Gasförmige Komponenten B strömen über polykristallines Ausgangsmaterial A der Temperatur T_1 . Die hierbei entstehenden Reaktionsprodukte zersetzen sich bei der Temperatur T_2 . A scheidet sich einkristallin ab, B verläßt das Gefäß G. H ist die Heizung. (entnommen aus Ch. Weißmantel, C. Hamann, Grundlagen der Festkörperphysik)

4.4 Hydrothermalsynthese

“Dieses Verfahren stellt einen interessanten Übergangsfall zwischen der Züchtung aus der Lösung und der Abscheidung aus der Gasphase dar. Es beruht auf der Tatsache, daß hochgespannter ”überkritischer” Wasserdampf, also Wasser im Bereich oberhalb des kritischen Punktes im Zustandsdiagramm, beträchtliche Mengen sonst nahezu unlöslicher Stoffe aufzunehmen vermag, eine Erscheinung, die beim geologischen Kristallwachstum, aber auch bei der Abscheidung von Kesselstein in Kraftwerken eine wichtige Rolle spielt. In Nachahmung der natürlichen Prozesse läßt man überspannten, mit SiO_2 gesättigten Wasserdampf in großen Hochdruckreaktoren wochenlang bei $400\text{ }^\circ\text{C}$ und $4 \cdot 10^8\text{ Pa}$ auf Impfkristalle einwirken und erreicht so das Wachstum großer Quarz-Einkristalle in ausgezeichneter Qualität.“⁴⁹

⁴⁹ ebda.

4.5 Kristallzüchtung aus der Schmelze

Die Kristallzüchtung aus der Schmelze⁵⁰ stellt eines der wichtigsten Verfahren zur labormäßigen und technischen Herstellung von Einkristallen von Metallen und Halbleitern dar. Dieses Verfahren nutzt die Phasenumwandlung vom flüssigen in den festen Aggregatzustand aus. Eine geschmolzene Substanz wird mit einem Kristallkeim geimpft, und beim allmählichen Erstarren unter sorgfältig gewählten Bedingungen scheidet sich das gesamte Material als einheitlicher Kristall ab, ohne daß sich neue Keime bilden. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich in der unterschiedlichen Anbringung des Impfkristalls.

Nach dem Verfahren von **Nacken** und **Kyropoulos**⁵¹ gibt man den Impfkeim in die Schmelze und läßt das Material durch langsame Abkühlung des Ofens erstarren. Ein Nachteil bei diesem Verfahren ist, daß Schmelzwärme freigesetzt wird und sich dadurch Spannungen aufbauen, wodurch das Kristallwachstum erheblich gestört werden kann.

Vorteilhafter ist die Methode nach **Bridgman** und **Stockbarger**⁵² (siehe Abb. 25), bei der sich der Impfkristall am ausgezogenen Ende der abgeschmolzenen Ampulle befindet. Mit Hilfe eines geeigneten Mechanismus wird die Ampulle erschütterungsfrei und gleichmäßig durch einen rohrförmigen Ofen mit vertikalem Temperaturgradienten abgesenkt. Durch diese Modifikationen gegenüber dem Verfahren von Nacken und Kyropoulos erzielt man hier eine gleichmäßige Erstarrungsfront und eine bessere Wärmeabführung an der Phasengrenzfläche.

⁵⁰ Vgl. ebda.

⁵¹ Vgl. ebda.

⁵² Vgl. ebda.

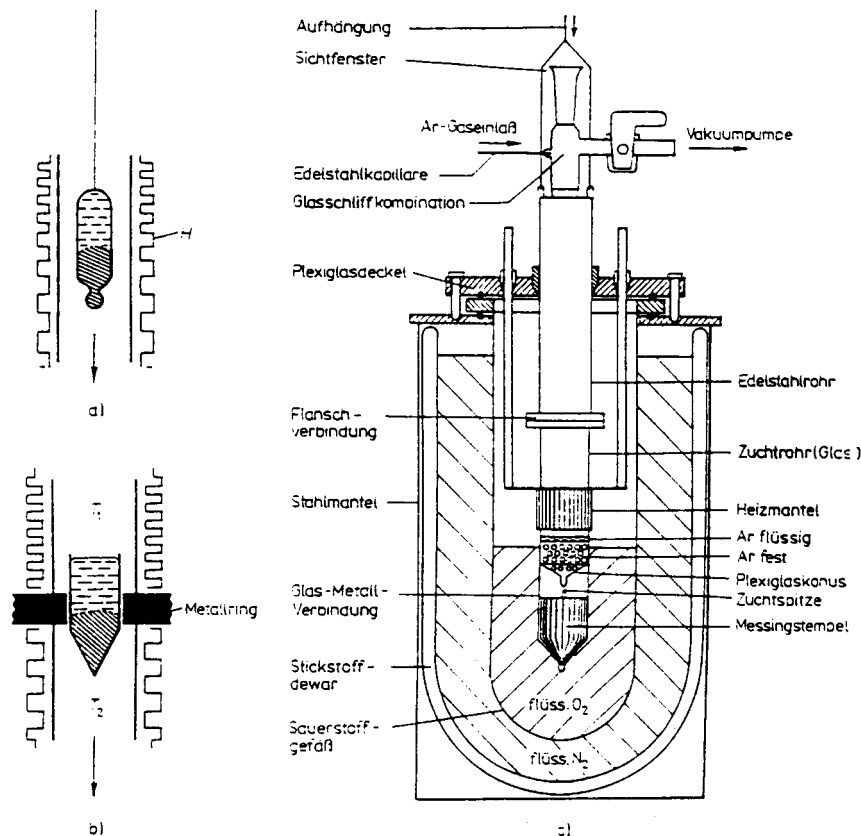


Abb. 25

Einkristallzüchtung aus der Schmelze nach Bridgman und Stockbarger

a) Methode nach Bridgman

b) Methode nach Stockbarger

Das im oberen Teil T_1 aufgeschmolzene Material wird langsam in dem unteren Ofenbereich, in dem eine niedrigere Temperatur T_2 aufrechterhalten wird, abgesenkt, wobei das Material kristallisiert. Der Metallring zwischen beiden Ofenteilen dient zur Realisierung eines stabilen Temperaturgradienten.

c) Prinzip einer Anlage zur Züchtung von Edeltgas-einkristallen, die auf der Methode von Stockbarger basiert. (Lüscher, E, in: Festkörperprobleme, Berlin 1970)
(entnommen aus Ch. Weißmantel, C. Hamann, Grundlagen der Festkörperphysik)

Das am weitesten verbreitete Verfahren ist das Verfahren nach **Czochralski**⁵³. Es wird für die labortechnische sowie für die industriemäßige Herstellung benutzt und arbeitet mit einem Impfkern von wenigen mm Durchmesser, der an einem wassergekühlten Metallstab angebracht ist (siehe Abb. 26). Der Metallstab wird soweit abgesenkt, daß sich der Kern dicht oberhalb der Schmelze befindet.

⁵³ Vgl. dazu Josef Safarik, Josef Vojta, Ottokar Radkorsky, a.a.O., S. 128 oder Fritz Heywang, Erwin Nücke, Jochen Timm, Walter Timm, a.a.O., S. 296

In der Folge wird die Temperatur auf einen im Gleichgewicht zwischen Kühlung durch den Stab und Aufheizung durch die Schmelze passenden Wert eingestellt. Erst nachdem sich die Temperatur stabilisiert hat, beginnt das Kristallziehen nach einem vorgegebenen Programm. Der Kristall wächst an der Oberfläche der Schmelze auf. Der Durchmesser des Kristalls wird durch Geschwindigkeit und Temperatur geregelt. Sein Durchmesser beträgt zwischen 25 mm und 100 mm bei einer Länge von 200 mm und mehr. Während des Ziehvorgangs rotiert der Stab mit dem wachsendem Kristall gleichmäßig um die eigene Achse, wobei manchmal der Tiegel in die Gegenrichtung gedreht wird. Der Grund für dieses Drehen liegt darin, daß die Temperaturverteilung besser ist und eine gleichmäßige Durchmischung der Schmelze, die von unten nachfließt, gewährleistet wird. Auch wird der Abtransport der freiwerdenden Schmelzwärme durch Konvektion gefördert. Geheizt werden solche Anlagen mit Graphitheizer oder auf induktivem Wege. Der Tiegel und die Ziehvorrichtung sind unter Inertgas in einem Quarzrohr oder einem Metallrohr mit Beobachtungsfenster eingeschlossen.

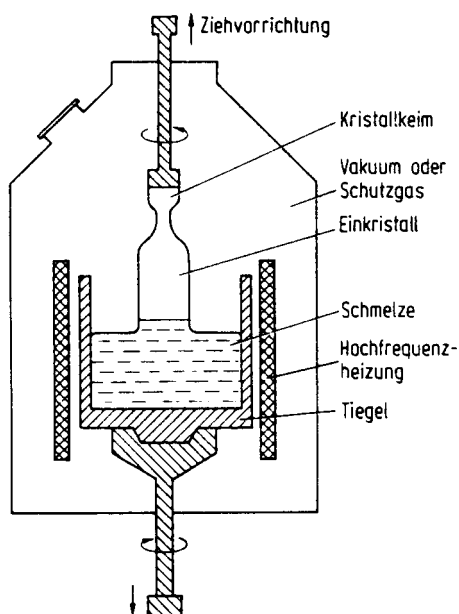
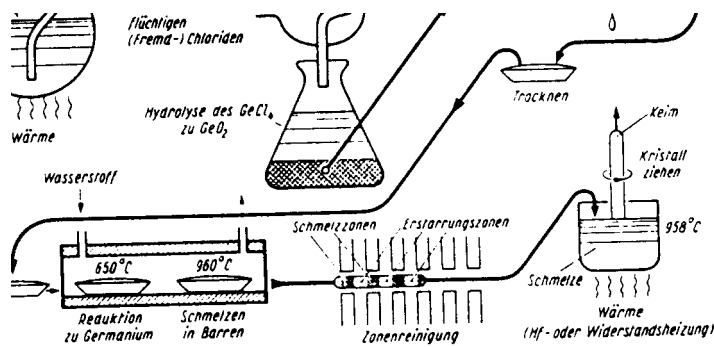


Abb. 26

Apparatur zum Ziehen von Einkristallen nach dem Czochralski-Verfahren.

Um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erreichen, rotieren Tiegel und Kristall mit etwa 10 Umdrehungen pro Minute.

(entnommen aus Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik)



gewinnung eines Germanium-Einkristalls aus noch nicht gereinigtem Germaniumoxid. Das Bild zeigt die einzelnen Vorgänge: Zunächst das Umwandeln des Germaniumoxids in eine Germaniumchlorverbindung und deren Destillation, die hier nur einmal dargestellt ist, in Wirklichkeit aber mehrfach hintereinander vorgenommen wird. Dann die Hydrolyse der Germaniumchlorverbindung zu Germaniumoxid, das Abfiltrieren der Flüssigkeit, das Trocknen des Germaniumoxids, die Reduktion zu metallischem Germanium, das Schmelzen in Barren, das Reinigen im Zonenschmelzverfahren und das Ziehen des Einkristalls nach dem Czochralski-Verfahren.

Abb. 27

Gewinnung eines Germanium-Einkristalls aus noch nicht gereinigtem Germaniumoxid. Das Bild zeigt die einzelnen Vorgänge: Zunächst das Umwandeln des Germaniumoxids in eine Germaniumchlorverbindung und deren Destillation, die hier nur einmal dargestellt ist, in Wirklichkeit aber mehrfach hintereinander vorgenommen wird. Dann die Hydrolyse der Germaniumchlorverbindung zu Germaniumoxid, das Abfiltrieren der Flüssigkeit, das Trocknen des Germaniumoxids, die Reduktion zu metallischem Germanium, das Schmelzen in Barren, das Reinigen im Zonenschmelzverfahren und das Ziehen des Einkristalls nach dem Czochralski-Verfahren. (entnommen aus Telefonken-Fachbuch, Der Transistor I)

Eine weitere Variante ist das **Verneuli - Verfahren**⁵⁴ (siehe Abb. 28), bei dem das Ausgangsmaterial fein pulverisiert und in einer heißen Flamme eines Gasgebläses auf einer Unterlage geschmolzen wird. Die Unterlage senkt sich langsam ab, sodaß ein birnenförmiger Einkristall aufwächst. Mit diesem Verfahren werden hauptsächlich synthetische Halbleitersteine, wie zum Beispiel Korund und Spinell, technisch hergestellt.

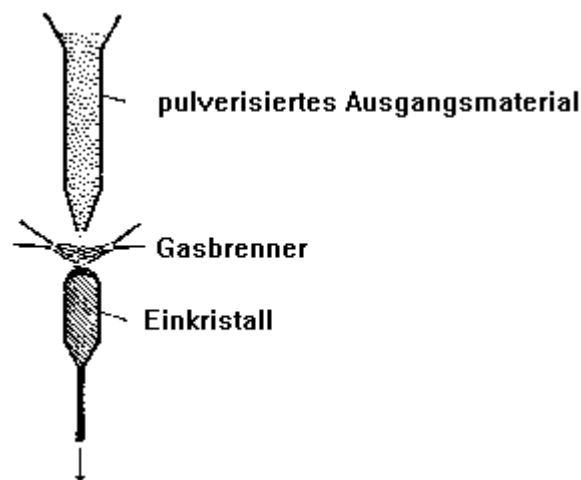


Abb. 28

Kristallzüchtung nach dem Verneuil - Verfahren (entnommen aus Ch. Weißmantel, C. Hamann, Grundlagen der Festkörperphysik)

⁵⁴ Vgl. Ch. Weißmantel, C. Hamann. a.a.O., S. 107

4.6 Kristallbildung durch Phasenumwandlung im festen Zustand

Auch innerhalb von Stoffen mit festem Aggregatzustand ist es möglich das Wachstum von Kristallen aus anderen kristallinen oder amorphen Strukturen zu bewirken. Da die Bewegung der atomaren Bausteine sehr gering ist, verlaufen solche Vorgänge nur sehr langsam und sind daher für die Einkristallzucht nicht wirklich profit bringend.

Eine einzige wirklich sinnvolle Ausnahme bildet die **Höchstdruck-synthese** von Diamanten aus Graphit, die bereits seit 1953 durchgeführt wird.⁵⁵

4.7 Zonenschmelzverfahren

Beim Zonenschmelzen gibt es zwei Arten. Die eine wandelt einen noch **polykristallinen** Stab in einen **einkristallinen** um, und die andere wird zum **Reinigen** von Einkristallen eingesetzt.

4.7.1 Umwandlung eines polykristallinen Stabes in einen einkristallinen

Um einen polykristallinen Stab in einen Einkristall umzuwandeln, werden mit einer Heizung Stück für Stück schmale Zonen des Materials aufgeschmolzen. Die Heizzone wird so langsam durch den gesamten Stab geführt. Die aufgeschmolzene polykristalline Zone scheidet sich nach Abkühlung einkristallin ab. Das Zonenschmelzverfahren bietet technische Vorteile, weil es direkt nach der physikalische Reinigung durch Zonenschmelze anwendbar ist. Wird diese Anordnung senkrecht aufgebaut, wird der Tiegel weggelassen (siehe Abb. 29). Dadurch fällt die Gefährdung von Verunreinigung infolge von Austausch mit Materialien von den Wänden weg, auch können beim Abkühlen keine Spannungen entstehen.

⁵⁵ Weiterführende Literatur zur Höchstdrucksynthese siehe ebda., S. 108

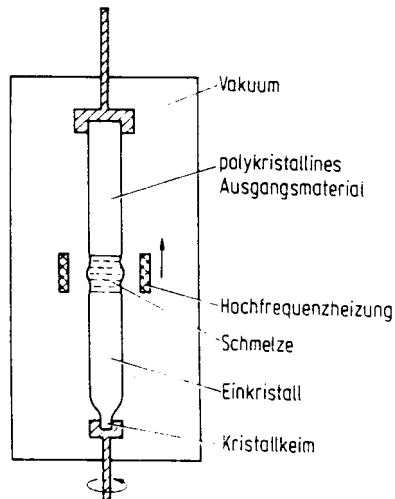


Abb. 29
Zonenschmelzverfahren zur tiegelfreien Züchtung von Reinstkristallen aus der Schmelze
(entnommen aus Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik)

4.7.2 Physikalische Reinigung von Einkristallen

Das Zonenschmelzverfahren zum Reinigen von Einkristallen wurde von Pfann⁵⁶ entwickelt, um einen noch höheren Reinheitsgrad von Halbleitermaterialien zu erreichen. Mit Hilfe von chemischen Trennverfahren und Ionenaustausch konnte man den Reinheitsgrad hinaufsetzen. Es ist möglich, den Gehalt an Fremdstoffen noch einmal um Zehnerpotenzen zu senken.

Das Zonenschmelzverfahren ist heute Standard zur Siliziumreinigung. Zum Betrieb eines Zonenschmelzofens können mehrere Energiequellen, wie z.B. induktive Heizung, Laserheizung oder Elektronen Beam, genutzt werden. Durch das zonenweise Aufschmelzen wird ein Teil aufgeschmolzen, gereinigt und wieder abgekühlt. Alle Fremdstoffe werden dabei immer wieder in die neue flüssige Zone weiter transportiert. Dies hat einen großen Nachteil zur Folge. Mit der Länge, die die Flüssigkeitszone überstrichen hat, steigt der Grad der Fremdatome in der Flüssigkeit an. Dadurch sinkt der Gradient der Fremdatome und die Reinigungswirkung nimmt ab. Damit steigt auch die Konzentration der Verunreinigungen in der festen Phase mit der bearbeiteten Länge.

⁵⁶ Vgl. ebda., S. 113

4.8 Weiterbearbeitung der Rohhalbleiter

Nach einer Kontrolle, die sich hauptsächlich auf die elektrische Leitfähigkeit bezieht, wird der so gewonnene Einkristall in Scheiben geschnitten. Da immer kleinste Unebenheiten beim Schneiden auftreten, werden die "Wafer" genannten Halbleiterscheiben in einem weiteren Arbeitsgang geläpft⁵⁷. Die so präparierte Oberfläche ist aber immer noch nicht glatt genug, außerdem könnten sich kleine Schleifmaterialreste in die Oberfläche eingedrückt haben. Abhilfe kann man mit einer Beize in einer geeigneten Säurekombination schaffen.

Anschließend werden die Wafer noch gewaschen und gerastert. Abschließend werden die quadratischen Formen für Bauelemente eingeritzt, damit die Chips, wenn sie dotiert sind, gebrochen werden können.

⁵⁷ "läppen" bedeutet das Glätten und Parallelisieren der Siliziumoberfläche. Dies geschieht mit Hilfe von zwei gegeneinander rotierenden Eisenscheiben. Der Wafer befindet sich zwischen den beiden Scheiben und wird durch die Rotationsbewegung und das Läppmittel (eine Mischung aus Läpppaste und Trägersubstanz wie z.B. Si-Carbid) bearbeitet.

5. Herstellung von IC's und verschiedene Technologien

5.1 Geschichte der Ic-Herstellung

Die Ideen von der Herstellung von Schaltintegrationen auf Chips stammen von Noyce, Kilby und Lehovec aus dem Jahre 1959.⁵⁸

Heute werden Tausende von Chips auf einer Halbleiterscheibe mit einem Durchmesser von mehreren Zoll erzeugt, wobei sich auf einem Chip mehr als eine Million Schaltkeise befinden.⁵⁹

Minimale Strukturgröße δ :	Chipfläche A_c :
1965 10 μm	1965 4 mm^2
1975 5 μm	1975 25 mm^2
1985 1 μm	1985 100 mm^2
1995 0,4 μm	1995 400 mm^2

Abb. 30

Tabelle zum Vergleich der ständigen Verkleinerung der Strukturabmessung der Bauelemente gegenüber der Vergrößerung der Chipfläche (entnommen aus A. Möschwitzer, Grundlagen der Halbleiter und Mikroelektronik)

Was sind die Triebkräfte zur ständigen Steigerung des Integrationsgrades? Mit der Steigerung des Integrationsgrades werden folgende Parameter eines gesamten elektronischen Systems verbessert:⁶⁰

- Preis und Leistungsverbrauch pro elektronischer Elementarfunktion sinken
- Arbeitsgeschwindigkeit und Zuverlässigkeit steigen
- neue Systemkonzepte werden bei sehr hohem Integrationsgrad überhaupt erst möglich

Mit der Verbesserung der Technik wurde eine Verringerung der Strukturgröße möglich, damit wurde eine Steigerung der Produktion erreicht. Die Erhöhung der Chipfläche ist eng mit der Fertigungsausbeute verbunden. Die Ausbeute ist die Anzahl an funktionsfähigen Chips auf einer Halbleiterscheibe zur Gesamtzahl aller Chips. Da die Ausbeute mit dem Preis der Chips in Zusammenhang steht, wird versucht, durch immer weiter verbesserte Technologien die Ausbeute zu steigern, weil die Anzahl der Defekte durch Fehler im Kristall oder Fehler durch unzulässige Präparation erniedrigt werden.

⁵⁸ Vgl. dazu A. Möschwitzer, Grundlagen der Halbleiter und Mikroelektronik. Band 2, Integrierte Schaltungen. München, Wien 1992, S. 1

⁵⁹ Vgl. ebda.

⁶⁰ Vgl. ebda.

Die ständig steigenden Integrationsgrade haben zu einer formalen Einteilung in verschiedene Epochen der Integration geführt.⁶¹

Anzahl der Bauelemente auf einem Chip	Epoche
< 100	SSI = Small Scale Integration
100 bis 10 ³	MSI = Medium Scale Integration
10 ³ bis 10 ⁴	LSI = Large Scale Integration
10 ⁴ bis 10 ⁶	VLSI = Very Large Scale Integration
10 ⁶ bis 10 ⁸	ULSI = Ultra Large Scale Integration
> 10 ⁸	GLSI = Giant Large Scale Integration

Abb. 31
Mikrosystemintegration
(entnommen aus A. Möschwitzer, Grundlagen der Halbleiter und Mikroelektronik)

5.2 Basistechnologien

Zur Herstellung eines ICs ist die Präparation eines Halbleiterkristalls nötig. Dieser wird mit dotierten Schichten und darüberliegenden Abscheidungen von mehreren halbleitenden, isolierenden und leitenden Schichten präpariert. Die verschiedenen Basistechnologien werden je nach Art und Anzahl der Schichten, Strukturen und dem sich daraus ergebenden Wirkprinzip unterschieden. Zu den wichtigsten Basistechnologien gehören die **Bipolartechnik**, die **MOS-Technik** und die **CMOS -Technik**. Doch um diese Basistechnologien ausführen zu können, sind einige **Elementarprozesse** notwendig. Zu den wichtigsten Elementarprozessen gehören:

- Epitaxie
- Dotierung durch Diffusion und Ionenimplantation
- Abscheidung isolierender und leitender Schichten
- Strukturierung (Lithografie)

Epitaxie:

“Epitaxie ist die Technik des Abscheidens von halbleitenden Schichten auf einer Halbleiterscheibe. Das epitaktische Wachstum entspricht grundsätzlich dem Kristallwachstum, wobei auf der Substratunterlage eine Nukleation eintritt. Je nach Prozeßführung wird die aufwachsende Schicht amorph, polykristallin oder einkristallin sein. Im letzten Fall ist eine gute Gitteranpassung zur Substratunterlage erforderlich, damit keine Spannungen und Fehlstellen entstehen.“⁶²

⁶¹ Vgl. ebda., S. 3

⁶² Vgl. ebda., S. 4

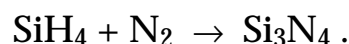
Besteht die Schicht und die Unterlage (Substrat) aus dem gleichen Grundmaterial, so spricht man von einer **Homoepitaxie**, andernfalls von einer **Heteroepitaxie**.

Man unterscheidet folgende verschiedene Technologien von Epitaxie. Die **Flüssigphasenepitaxie** (LPE = liquid phase epitaxy) wird bei optoelektronischen Bauelementen teilweise mit III-V Verbindungen eingesetzt. Die **Gasphasenepitaxie** (VPE = vapour phase epitaxy, CVD = chemical vapour deposition) wird zur Erzeugung von großflächigen Schichten genutzt und die **Molekularstrahlenepitaxie** (MBE = molecular beam epitaxy)⁶³, mit welcher man besonders reine und dünne Halbleiterschichten herstellen kann.⁶⁴

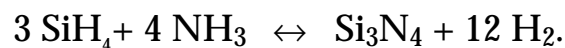
Abscheidung isolierender und leitender Schichten:

Zur Abscheidung isolierender und leitender Schichten gibt es verschiedene Verfahren.

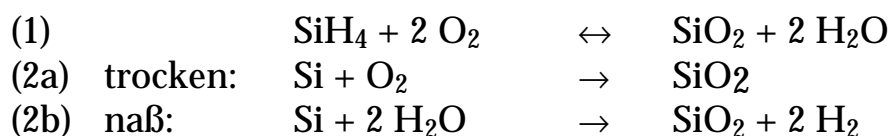
Für Si₃N₄ gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten.⁶⁵ Die erste ist die **Silannitratation im Plasma** bei niedrigen Temperaturen. Dabei wird aus



Die zweite Möglichkeit ist das **CDV-Verfahren**, dabei wird aus



Für SiO₂ wird das CVD-Verfahren (1) und die **Thermische Oxidation** (2a-trocken, 2b-naß) bei 1000°C von Siliziumoxid angewendet.



Die Herstellung von Siliziumschichten für Verbindungshalbleiter erfolgt durch **Elektronenstrahlverdampfung** von Schwermetallen. Die Formierung des Silizides erfolgt dann auf einem Substrat bei 800°-900°C. Aluminium wird durch Verdampfen im Hochvakuum erzeugt und ist gleichzeitig das Standardmaterial für Verbindungs-

⁶³ Weiterführende Literatur siehe Herbert Freyhardt, Franz Ulrich Hillebrecht u.a., a.a.O., S. 290

⁶⁴ Weiterführende Literatur siehe A. Möschwitzer, a.a.O., S. 5 und Herbert Freyhardt, Franz Ulrich Hillebrecht u.a., a.a.O., S. 13

⁶⁵ Vgl. A. Möschwitzer, a.a.O., S. 5

Halbleiter⁶⁶. Eine weitere Methode zur Schichtabscheidung ist die **Kathodenzerstäubung** für schwer schmelzbare Materialien.⁶⁷

Dotieren:

Dotieren⁶⁸ von Halbleitern durch **Diffusion** und **Ionenimplantation** sind zwei wichtige Vorgänge, um die Effektivität eines Halbleiters wesentlich zu erhöhen.

Die Diffusion findet folgendermaßen statt: auf der Halbleiteroberfläche befindet sich eine Diffusionsmaske, dieser werden gasförmige Fremdatome angeboten, die dann bei großer Hitze eindiffundieren können. Zuerst findet die Diffusion unter die Oberfläche des Halbleiters statt, dann kommt es zur "Drive In Phase", in der es zur Tiefendiffusion kommt. Je länger die Diffusion anhält, desto tiefer wird diffundiert, und die Oberflächenkonzentration sinkt, da das Reservoir endlich ist. Diese Diffusion ist einfach und billig, sie hat aber einen Nachteil. Es entstehen keine scharfen Grenzen.

Bei der Ionenimplantation werden Ionen in den Halbleiter eingeschossen. Je größer die Ionenimplantationsenergie ist, desto tiefer können die Ionen eindringen. Nach dem Ionenbeschuss wird der Halbleiter noch getempert, das heißt er braucht eine Ausheilzeit, bei der er einige Stunden auf einer Temperatur gehalten wird, die nicht weit unterhalb der Schmelztemperatur liegt. Die Vorteile der Ionenimplantation sind, daß eine vorgegebene Dotierung sehr genau eingehalten werden kann und daß durch die geringen Eindringtiefen der Ionen extrem oberflächennahe Schichtbereiche dotiert werden können. Auch sind scharf voneinander abgegrenzte Dotiergebiete erreichbar. Die Ionenimplantation stellt einen Niedertemperaturprozeß dar, wodurch die Kompatibilität mit anderen Prozeßschritten erhöht wird. Nachteilig sind die bei der Implantation auftretenden Strahlungsschäden, die durch die Temperung eliminiert werden müssen, und der höhere technische Aufwand. Dennoch kann eine beträchtliche Qualitätsverbesserung von Halbleiterbauelementen erreicht werden, die den Einsatz dieser Technik mehr als rechtfertigt.

⁶⁶ Zu Verbindungshalbleiter vgl. FBA, S. 12

⁶⁷ Zur Herstellung von Si-Schichten vgl. A. Möschwitzer, a.a.O., S. 6

⁶⁸ "dotieren" kommt aus dem Lateinischen und bedeutet "schenken".

Strukturierung:

Zur Strukturierung von Schichten sind Ätzverfahren notwendig. Man unterscheidet zwischen **chemischen** und **physikalischen Verfahren**. Bei chemischen Verfahren werden Lösungsmittel, wie zum Beispiel Fluor-Wasserstoffverbindungen, eingesetzt, welche die zu entfernenden Schichten auflösen sollen.

Physikalische Verfahren bewirken das Abtragen von Schichten infolge von Teilchenbeschuß. Die Ionen werden zum Beispiel in einem HF-Plasma (Plasmaätzen) erzeugt, wobei zusätzlich reaktive Komponenten verwendet werden können. Hiermit ist auch anisotropes Ätzen möglich, das für die 3D-Struktur wichtig ist.

Zur Erzeugung von bestimmten Halbleiterbauelementen müssen Schichten dotiert und Halbleitergebiete strukturiert werden. Dieses geschieht mit Hilfe der **Mikrolithografie**⁶⁹. Bei dieser Prozedur werden Halbleiterschichten mit Fotolack überzogen und anschließend mit UV-Licht oder Elektronenstrahlen bestrahlt. Nach dem Entwicklungsvorgang werden selektiv Teile des Fotoresistlackes entfernt. Wo der Lack entfernt worden ist, kann nun geätzt werden, auf noch lackbeschichteten Stellen bleibt die Halbleiterschicht unverändert.

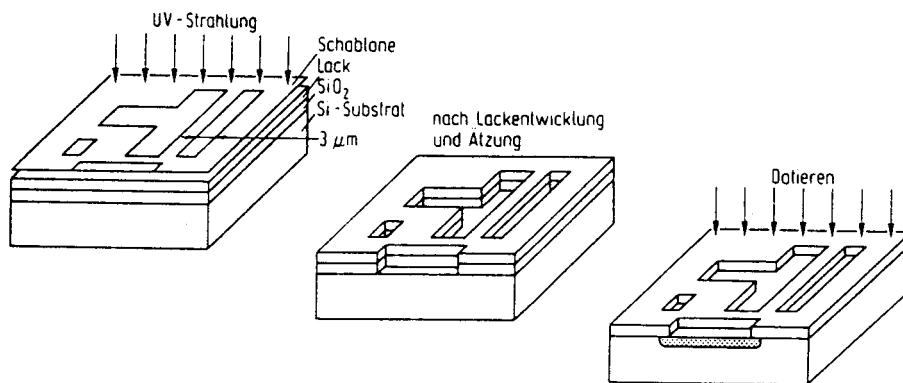


Abb. 32

Prozessschritte bei der Mikrolithographie

(entnommen aus A. Möschwitzer, Grundlagen der Halbleiter und Mikroelektronik)

Auf einer Halbleiterschicht befinden sich Tausende von Schaltkreisen, sogenannte "Retikel", welche mit Hilfe einer Schablone strukturiert werden. Wenn man diese Schablone in einem bestimmten Abstand von der Fotolackschicht hält, kann man die Schablone mehrmals verwenden. Diese Art wird als **Proximitylithografie** bezeichnet.

⁶⁹ Vgl. A. Möschwitzer, a.a.O., S. 9

Die modernere Variante zum Strukturieren von großen Scheibendurchmessern heißt **Waferstepper**. Dabei wird die Belichtung der einzelnen Schaltkreise Schritt für Schritt für jede Schaltkreisstruktur einzeln durchgeführt. Ein großer Vorteil dieser Methode ist, daß auch für die Randgebiete der Wafer dieselben Bedingungen gegeben sind.⁷⁰

Nachdem die Schaltkreise strukturiert und dotiert sind, muß jeder Schaltkreis einzeln getestet werden, um Chips mit Fehlern zu identifizieren und auszusortieren. Dies geschieht mit einem Wafertester. Es werden auf die sich am Rand des Chips befindlichen Kontaktflächen, die sogenannten "Bondinseln", Kontaktsonden (Testerspitzen) aufgesetzt. Je nach Komplexibilität der Funktion des Schaltkreises erfolgt dann, von einem Meßcomputer gesteuert, eine elektrische⁷¹ und funktionelle Testung. Dies erfolgt für jeden Chip separat, und diejenigen, bei denen das Testergebnis "Funktion nicht erfüllt" lautet, werden mit einem Lacktropfen markiert und scheiden für die weitere Verarbeitung aus.

Nach dem Testen werden die Chips vereinzelt, die unbrauchbaren werden aussortiert und können recyclet werden. Die funktionsfähigen Chips werden in ein Gehäuse montiert und einer nochmaligen Endprüfung unter Streßbedingungen (mechanischen und technischen) unterzogen. Erst wenn auch dieser letzter Test positiv verläuft, sind die Chips fertig zur Auslieferung.

Um nun einen Gesamtüberblick über die Herstellung eines integrierten Schaltkreises geben zu können, stellt die folgende Abbildung den Prozeß von einer Halbleiterschicht bis zum fertigen IC noch einmal dar.⁷²

⁷⁰ Zur Proximitylithografie und zu Waferstepper vgl. ebda., S. 10

⁷¹ Damit ist eine Prüfung nach statischen und dynamischen Strom-Spannungs Verhalten gemeint.

⁷² Zur folgenden Graphik vgl. A. Möschwitzer, a.a.O., S. 11

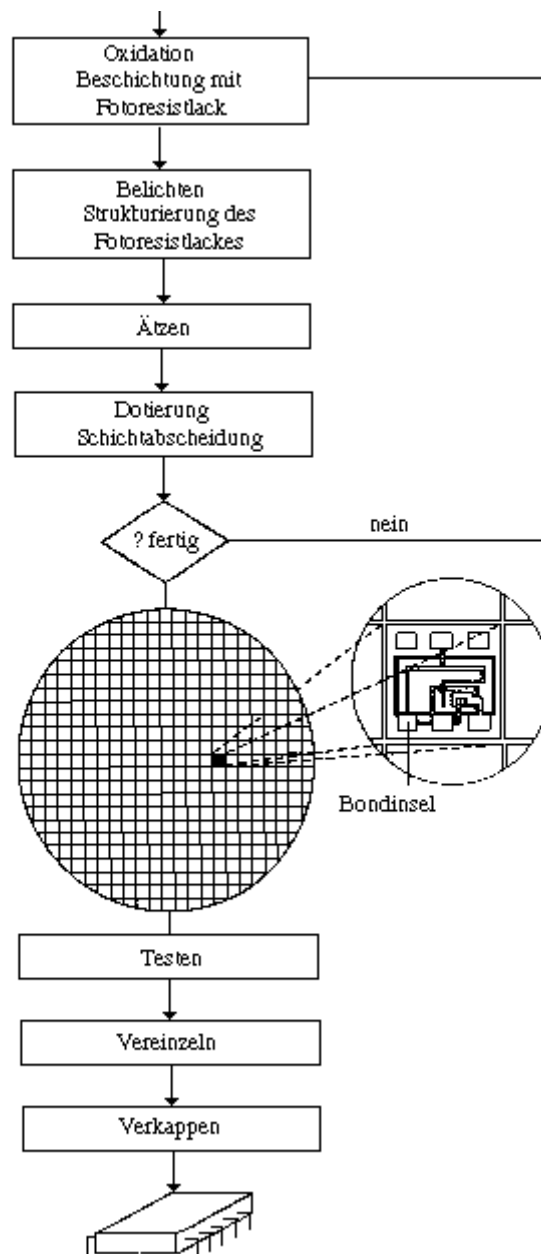


Abb. 33
Darstellung des Gesamtablaufes der Fertigung eines integrierten Schaltkreises
(entnommen aus A. Möschwitzer, Grundlagen der Halbleiter und Mikroelektronik)

5.3 MOS-Technologien

Bipolartechnik:

Eine zwei Jahrzehnte lang eingesetzte Basistechnologie ist das SBC-Verfahren (standard buried collector).⁷³

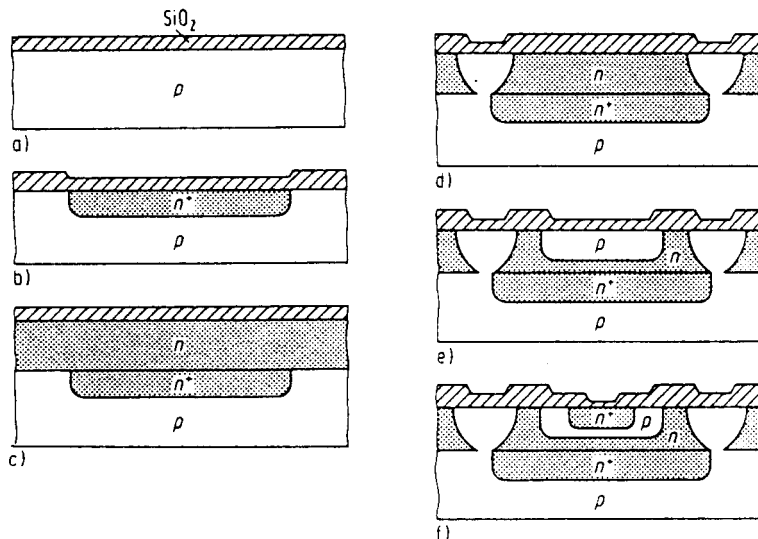


Abb. 34

Prozessschritte des SBC-Verfahrens zur Herstellung von Bipolarschaltkreisen
(entnommen aus A. Möschwitzer, Grundlagen der Halbleiter- und Mikroelektronik)

Als Ausgangsmaterial (siehe Abb. 34) dient ein p-leitendes Siliziumplättchen⁷⁴ (a), in das "begrabene" (buried), hochdotierte n^+ -Schichten eindiffundiert (b) werden. Danach erfolgt das Aufwachsen einer n-leitenden Epitaxieschicht (c). Anschließend folgt die Zerteilung der Epitaxieschicht in **isolierte Inseln** durch tiefe n-Schachtdiffusion (d), welche der späteren Isolation dienen sollen. Der nächste Schritt ist eine Akzeptordiffusion für die Basis und eine Donatordiffusion für den Emitter.

Ein großer Nachteil dieser Technologie ist, daß die Isolation der Bauteile nur durch pn-Übergänge realisiert ist. Sie sind in Sperrichtung vorgespannt, lassen damit immer kleine Sperrströme durch und stören das dynamische Verhalten der Bauelemente.

Hierbei kann das ISOPLANAR-Verfahren (siehe Abb. 35) Abhilfe schaffen.⁷⁵

⁷³ Vgl. ebda., S. 13

⁷⁴ Bei der Si-Herstellung kann Bor aus dem Tiegel in die Schmelze gelangen und das Silizium von vornherein p-leitend machen.

⁷⁵ Vgl. A. Möschwitzer. a.a.O., S. 14

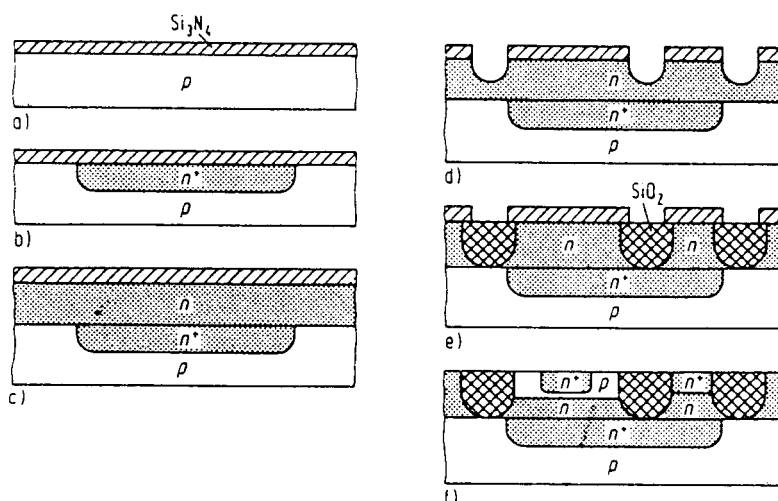


Abb. 35

Prozessschritte des ISOPLANAR-Verfahrens
(entnommen aus A. Möschwitzer, Grundlagen der Halbleiter- und Mikroelektronik)

Die Prozeßfolge ist dieselbe, nur wird der p-leitende Isolationsrahmen durch Siliziumoxydgräben (SiO_2 -Gräben) ersetzt.

NMOS-Technologie :

Mit der NMOS-Technologie werden wesentliche Funktionselemente für MOS-Feldeffekttransistoren in n-Kanal Ausführung realisiert.⁷⁶

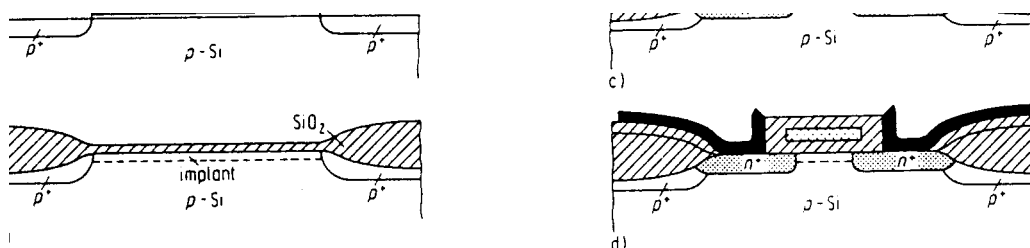


Abb. 36

Prozessschritte der MOS-Siliziumgate-Technologie
(entnommen aus A. Möschwitzer, Grundlagen der Halbleiter- und Mikroelektronik)

Auch hier (siehe Abb. 36) ist das Ausgangsmaterial ein p-leitendes Siliziumplättchen (a), auf das eine SiO_2 und eine Si_3N_4 -Schicht abgeschieden ist. Dieses Schichtsystem dient als Maske für die p^+ -Kanalstopperimplantation (a) und die anschließende Feldoxidation (b). Mit der Erzeugung dieser relativ dicken SiO_2 -Schicht zusammen mit dem p^+ -Kanalstopper wird die Isolation benachbarter MOS-Transistoren gegeneinander bewirkt. Hierbei bilden sich "aktive" Transistorgebiete (A-Gebiete), in welchen nun das Auf-

⁷⁶ Vgl. ebda., S. 15

wachsen einer dünnen Gateoxidschicht, einer flachen Borimplantation und einer Phosphorimplantation stattfindet. Der nächste Prozeßschritt beinhaltet das Abscheiden und Strukturieren einer polykristallinen Siliziumschicht (c), die als Gate wirkt. Nach der Diffusion bzw. der Implantation von Drain- und Sourcegebieten, erfolgt schließlich eine erneute Abscheidung von Siliziumoxid, die als Öffnung für die Kontaktfenster und Herstellung der Kontakte und Verbindungsleitungen benötigt wird.

CMOS-Technologie :

Als Unterschied zur NMOS-Technologie werden in der CMOS-Technologie (Combined-MOS) sowohl n- als auch p-Kanaltransistoren realisiert. Die Prozeßschritte sind im wesentlichen ähnlich denen der NMOS-Technologie mit dem einen wichtigen Unterschied, daß ein weiterer Prozeßschritt zur Realisierung einer n- oder p-Wanne notwendig ist.⁷⁷

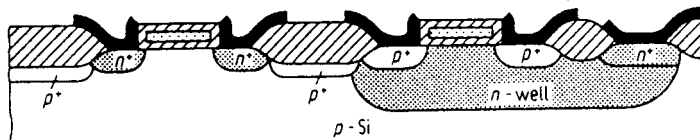


Abb. 37

Querschnitt einer n-Well CMOS-Struktur

(entnommen aus A. Möschwitzer, Grundlagen der Halbleiter- und Mikroelektronik)

Hier (siehe Abb. 37) bilden ein p-leitendes Siliziumplättchen, in das ein n-Kanaltransistor realisiert wird, den Ausgangspunkt, während der p-Kanaltransistor in einer n-Wanne (n-well) realisiert wird. Durch dickes Feldoxid und p⁺-Kanalstopper wird die seitliche Isolierung gewährleistet.

Auch diese Technologie wurde in den vergangenen Jahren weiterentwickelt. Zur Vermeidung des Thyristoreffekts⁷⁸ wurden die n- und p-Kanaltransistoren mit tiefen Trenchgräben isoliert (siehe Abb. 38).

⁷⁷ Vgl. ebda., S. 16

⁷⁸ Der Thyristoreffekt ist ein Vierschichteffekt, dessen genaues Verständnis den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Für besseres Verständnis des Effektes siehe Lexikon der Elektrotechnik. Band 3, S. 335

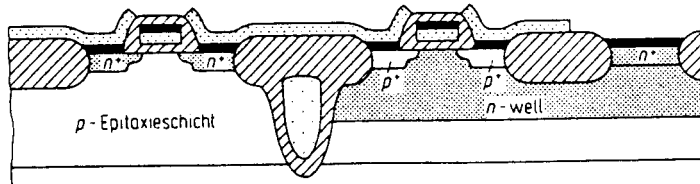


Abb. 38
 Querschnitt einer CMOS-Struktur mit Trenchgräben und schwach dotierten Source und Draingebieten
 (entnommen aus A. Möschwitzer, Grundlagen der Halbleiter- und Mikroelektronik)

Als Abschluß ist noch die BiCMOS-Technologie zu erwähnen, welche eine Kombination aus Bipolar- und CMOS-Technik ist. Sie dient zur Realisierung von Schaltkreisen mit sehr guten Verlustleistungen und Verzögerungszeiten.⁷⁹

⁷⁹ Die genauere Erklärung dieser Technologie würde den Rahmen der Arbeit überschreitenn. Genaueres dazu findet man bei A. Möschwitzer. a.a.O., S. 17

6. Abhängigkeiten

6.1 Druck

Piezo- und Pyroelektronische Effekte:

Piezo- und Pyroelektronischer Effekt treten oft gemeinsam auf. Piezoelektrische Materialien zeichnen sich dadurch aus, daß bei mechanischer Druck- oder Zugbelastung an ihren Oberflächen elektrische Ladungen auftreten.⁸⁰ Es ist möglich, diese Ladungen mit Elektroden abzugreifen. Diese elektrischen Ladungen sind auf die Atomverschiebungen im Kristall infolge der mechanischen Spannung zurückzuführen. Bei Kristallen mit polaren Achsen tritt die Piezoelektrizität auf. Der piezoelektrische Effekt wirkt nur dynamisch, weil die Ladungen von außen schnell kompensiert werden. Bei pyroelektrischen Materialien erhält man Oberflächenladungen bei geringer Temperaturänderung der Probe. Es gibt Einkristalle, Keramiken und Polymere mit solchen Eigenschaften.

6.2 Temperatur

6.2.1 Temperaturverhalten von Halbleitern

Ein Halbleiter ist bei tiefer Temperatur, nahe des absoluten Nullpunktes, ein Isolator. Wenn die Temperatur bis auf Raumtemperatur steigt, verändert sich seine Leitfähigkeit hin bis zu der eines guten Leiters. Diese Eigenschaft bedeutet, daß sein elektrischer Widerstand bei hohen Temperaturen geringer sein muß als bei Isolatoren.

Die Erwärmung von Halbleiterbauelementen kann auf zwei Arten vor sich gehen. Entweder durch Erwärmung von außen durch die Umgebungsluft durch benachbarte Bauteile, dann spricht man von **Fremderwärmung**, oder infolge des Stromdurchgangs. Man spricht dann von **Eigenerwärmung**, da sie im Bauelement selbst entsteht. Hierbei treten an einem Widerstand Verluste auf, die sich in Form von Wärme äußern

$$P = U \cdot I.$$

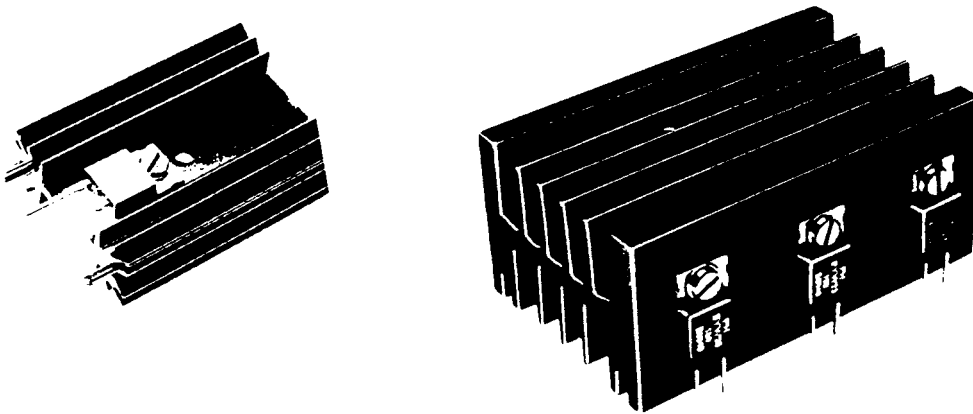
P umgesetzte Leistung
U hochliegende Spannung
I Strom

Zu hohe Temperaturen können den Halbleiter zerstören, weil die Fremdatome diffundieren. Die zulässige obere Grenztemperatur von

⁸⁰ Vgl. dazu W. Heywang, R. Müller, Halbleiter-Elektronik. Berlin, Heidelberg 1993, S. 119

Halbleiterbauelementen beträgt bei auf Silizium basierenden Bauteilen 150°C , bei auf Germanium basierenden 75°C .⁸¹

Auf Grund dessen muß bei allen Schaltungen mit Halbleitern dafür gesorgt werden, daß die Höchstgrenze nicht überschritten wird. Dies geschieht mit Hilfe von Kühlflächen oder Vorwiderständen. Als Kühlflächen fungieren besondere Kühlbleche, Kühlkörper oder Chassis. Als einfachstes Mittel zur Strombegrenzung dient der Vorwiderstand, den man an seinen Kennlinien leicht einordnen kann.



²⁰
Abb. 39
Darstellung von Kühlkörperbauformen

6.2.2 Temperaturmeßgeräte mit Halbleiterfühler

Halbleiter, die zur Temperaturföhlung eingesetzt werden, nennt man **Thermistoren** (THERmally - sensitive resISTOR). Diese Thermistoren gliedern sich in zwei Gruppen die **NTC**- und **PTC** - Thermistoren. NTC bedeutet negativer Temperaturkoeffizient, solche Widerstände heißen daher auch Heißleiter. PTC bedeutet positiver Temperaturkoeffizient, ihr Widerstand steigt mit zunehmender Temperatur, daher werden sie auch Kaltleiter genannt.

Der NTC hat eine nichtregulierbare Einsatztemperatur und ist für Messungen weniger geeignet, weil seine Ergebnisse stark nicht linear sind. Er findet Anwendung als Überhitzungsschutz für Föns, Strombegrenzung für Eigenerwärmung, Füllstandsmesser, Thermostaten oder als Verzögerungsschaltungen.

⁸¹ Vgl. dazu Lothar Weichert, Temperaturmessung in der Technik. Grundlagen und Praxis. Band 9, 3. Aufl., Grafenau, Berlin 1981, S. 103

Der PCT hingegen findet Anwendung bei Fieberthermometern, Einschaltstrombegrenzungen und Temperaturstabilisierungen. Solche Thermistoren werden keramisch hergestellt, zum Beispiel bei der Firma Siemens Matsushita in Deutschlandsberg.

6.2.3 Thermistoren

Die Aufgaben von Heißeleitern liegen vorrangig in der Temperaturmessung, sie werden aber auch für die kontinuierliche Regelung eingesetzt. Kaltleiter werden in Schaltungen zur Grenzwertüberwachung verwendet. Der Anwendungsbereich für Temperaturmessungen ist von -100°C bis $+300^{\circ}\text{C}$ begrenzt, bei maximaler Erhitzung bis $+400^{\circ}\text{C}$.⁸² Bei noch höheren Temperaturen ist die Langzeitstabilität nicht gewährleistet, denn der Eigenwiderstand wird so klein, daß keine Vorteile gegenüber Platin-Widerständen mehr gegeben sind. Bei tieferen Temperaturen als -100°C steigt der Widerstand auf mehrere Megaohm an, und damit entstehen Isolationsprobleme. Das exponentielle Verhalten der Widerstandskennlinie ist für Anzeigergeräte nicht brauchbar, daher müssen sie **linearisiert** werden, damit die Halbleiter untereinander austauschbar sind. Heißeleiter müssen vor ihrer Verwendung einen Alterungsprozeß durchlaufen, damit ihre Langzeitstabilität gewährleistet ist.

Halbleiterfühler werden in verschiedenen Bauformen hergestellt. Am meisten verbreitet und verwendet sind Perlen- oder Scheibenformen. Wichtig ist, daß die elektrische Belastung gering gehalten wird, damit keine große Eigenerwärmung und damit keine größeren Meßfehler entstehen.

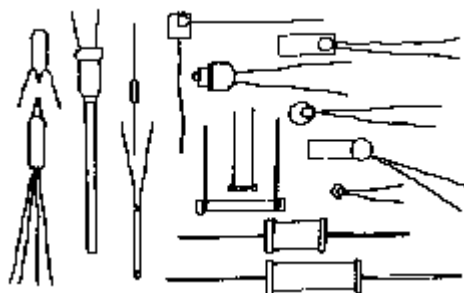


Abb. 40
Darstellung von verschiedenen NTC- Bauformen
(entnommen aus L. Weichert u.a., Temperaturmessung)

⁸² Vgl. ebda.

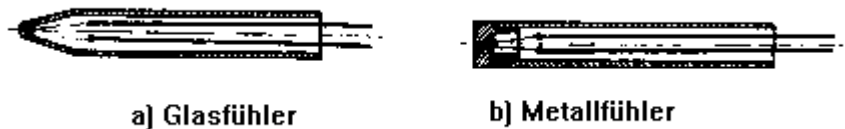


Abb. 41

a) Darstellung eines Glasfühlers

Die Heißeiterperle ist in die Spitze eines Rohres eingeschmolzen, sie kann daher dicht an die Meßfläche herangebracht werden. Nachteilig ist die schlechte Wärmeleitfähigkeit von Glas, daher werden solche Glasfühler nur in sehr aggressiven Medien zum messen verwendet.

b) Darstellung eines Metallfühlers

Hier wird die Heißeiterperle mit Kitt an einer Spitze aus Silber oder Gold, das gut wärmeleitend ist, befestigt.

(entnommen aus L. Weichert u.a., Temperaturmessung)

6.3 Optische Eigenschaften

Der Einsatzbereich von optoelektronischen Bauelementen reicht von Verbindungselementen zur elektrischen Signalverarbeitung bis zu vielfältigen Aufbauten von optischen Sensoren.⁸³ Für den Einsatz optischer Sensoren sind vor allem die folgenden Gründe maßgeblich:⁸⁴

- Vorliegen optischer Effekte oder Meßgrößen
- kontaktlose Messung
- Messung an schwer zugänglichen Stellen oder in aggressiver Umgebung (z.B. bei hohen Temperaturen)
- Hohe Genauigkeit (insbesondere bei interferometrischen Meßanordnungen)
- Weitgehende Immunität optischer Signale gegenüber äußeren elektromagnetischen Feldern
- einfache Potentialtrennung
- Vermeidung elektrischer Funken (höhere Explosionssicherheit)
- hohe Datengeschwindigkeit

⁸³ Zu optischen Eigenschaften vgl. auch Lumineszenzdiode, FBA, S. 64

⁸⁴ Zu diesen Gründen vgl. W. Heywang, R. Müller, a.a.O., S. 25

6.4 Magnetische Eigenschaften

Hall Effekt:

1879 fand Edwin Hall⁸⁵ zuerst an einer dünnen Goldschicht den später nach ihm benannten Hall-Effekt.⁸⁶ Der Hall-Effekt zählt zu den galvanomagnetischen Effekten, die in Medien mit elektrischer Leitfähigkeit, insbesondere in elektrisch leitenden Festkörpern, wie Metallen oder Halbleitern, auftreten. Nur bei Halbleitern ist der Effekt so groß, daß er Anwendung in Meß- und Regeltechnik als Hallsensor findet.

Ein langgestrecktes Plättchen (siehe Abb. 42) mit der Dicke d und der Breite b ist an beiden Schmalseiten mit Elektroden versehen, durch die der Strom I_1 fließt, hervorgerufen durch die Spannung U_1 . Etwa auf der Mitte der beiden Längsseiten sind zwei weitere Elektroden einander gegenüberliegend angebracht.

Die experimentelle Anordnung sieht folgendermaßen aus:

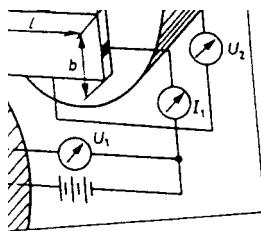


Abb. 42
Experimentelle Anordnung zur Messung des Hall-Effekts

(entnommen aus M. van Ardenne, Effekte der Physik und ihre Anwendung)

⁸⁵ Edwin Hall war ein amerikanischer Physiker, geb. 7.11.1855 und gest. 20.11.1938.

⁸⁶ Vgl. dazu Manfred van Ardenne, Effekte der Physik und ihre Anwendung. Berlin 1990, S. 356

Wird das Plättchen so in den Luftspalt eines magnetischen Kreises gebracht, daß die magnetische Induktion B senkrecht auf den Verbindungslinien zwischen den Elektroden steht, dann tritt zwischen den beiden, auf den Längsseiten angebrachten, Elektroden eine zusätzliche Spannung U_H , die Hall-Spannung auf:

$$U_H = R_H \cdot \frac{1}{d} \cdot I \cdot B, \quad R_H = \frac{1}{n \cdot e}$$

U_H Hallspannung
 I Stromstärke
 B magnetische Flußdichte
 R_H Hall-Konstante
 d Dicke der Platte
 n Ladungsträgerdichte
 e Elementarladung

Sie ist proportional zum Magnetfeld und zum Strom.⁸⁷ Der Grund dafür liegt in der Lorentzkraft⁸⁸, die auf bewegte Ladungsträger im Magnetfeld wirkt, und in der Begrenztheit des Leiters. Die Lorentzkraft wirkt senkrecht zur Bewegungsrichtung der Elektronen. Die Ladungsträger laden daher eine Längsseite negativ und die andere positiv auf. Die dabei entstehende Oberflächenladung und das daraus resultierende elektrische Feld wird Hall-Feld genannt. Besonders stark ist der Hall-Effekt in Materialien mit geringer Ladungsträgerkonzentration.

Anwendung findet der Hall-Effekt als Meßmethode zur Bestimmung des Leitertyps, der Ladungskonzentration und der Trägerbeweglichkeit in Halbleitern und Metallen in einem weiten Temperaturbereich sowie zur Messung von Magnetfelder.

⁸⁷ Vgl. ebda.

⁸⁸ Vom niederländischen Physiker Hendrik, Anton Lorentz, geb.18.07.1853, gest. 4.02.1928 entdeckte Kraft. Die "Lorentzkraft" ist jene Kraft, die auf eine bewegte elektrische Ladung in einem Magnetfeld wirkt.

7. Prinzipielle Funktion von Halbleiterbauelementen

7.1 Dioden

7.1.1 Grundgedanken der Dioden

Dioden⁸⁹ nennt man alle Halbleiterbauelemente, die aus einem pn-Übergang bestehen. **Transistoren** sind Bauteile mit zwei pn-Übergängen, Bauteile mit drei und mehr Übergängen werden je nach Aufbau und Wirkungsweise der Halbleiterstruktur benannt.

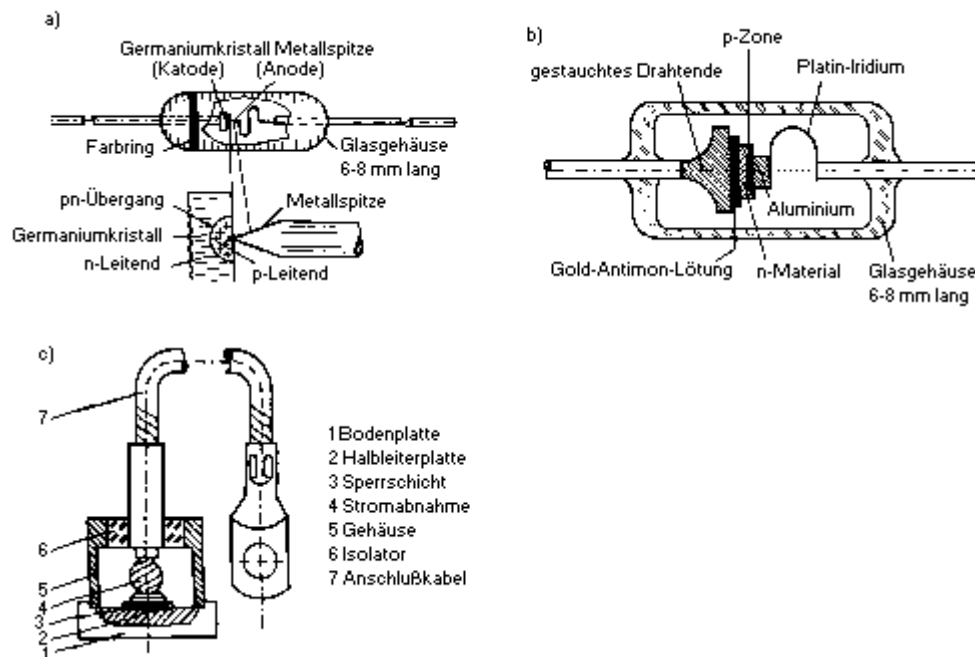


Abb. 43

Verschiedene Diodenbauformen (schematisch)

a) Spitzendiode (vergrößert)

b) Kleinflächendiode (vergrößert)

c) Flächendiode für hohe Leistung

(entnommen aus E. Böhmer, Elemente der angewandten Elektronik)

⁸⁹ Diode kommt aus dem Griechischen und bedeutet "Zweipol".

7.1.2 Der pn - Übergang

Wenn man zwei Schichten, eine p-leitend und eine n-leitend, in den Kristall dotiert, entsteht einer der wichtigsten und interessantesten Effekte, der Sperrschichteffekt.

Die entstehende **Grenzschicht** (siehe Abb. 44) am Übergang wird pn-Übergang genannt. An der Grenzschicht findet ein Ladungsausgleich statt. Die sich an der Grenze befindlichen überschüssigen Elektronen der n-Schicht und die Löcher der p-Schicht wandern teilweise in das Gebiet, wo sie in der Minorität, sind und gleichen die Ladungen aus. Aufgrund des dadurch entstehenden hohen elektrischen Feldes verarmt die Grenzschicht an freien Ladungsträgern und wird zur **Sperrschicht**.

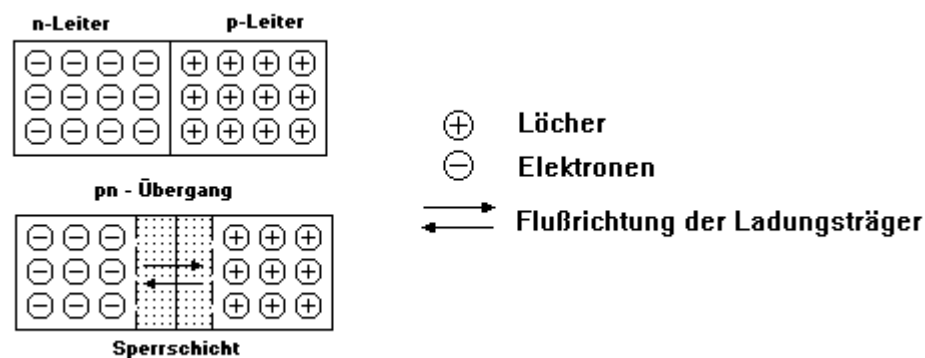


Abb. 44

pn-Übergang: weil sich die Ladungen im Grenzbereich aufheben, verarmt der Übergang an der Grenzschicht an freien Ladungsträgern, es entsteht die Sperrschicht.

Die Spannung, die nötig ist, um die Sperrschicht zu überwinden, nennt man **Diffusions-** oder **Schwellesspannung**. Dieser Sprung ist materialabhängig und beträgt in der Siliziumsperrschicht etwa 0.7 V und für die Germaniumsperrschicht 0.3 V. Der Name kommt daher, da, eine Spannung aufgebracht werden muß, um die Sperrschicht abzubauen, diese also eine Art Schwelle darstellt.

Legt man nun eine Spannung an, sodaß der Pluspol am p-Leiter und der Minuspol am n-Leiter angeschlossen ist, so passiert folgendes: vom Pluspol dringen die positiven Ladungen in den p-Leiter, dadurch werden Elektronen entzogen, und neue Löcher entstehen. Am Minuspol entsteht ein Überschuß an Elektronen. Damit steigt die Ladungsträgerzahl in beiden Schichten an. Der pn-Übergang ist in Durchlaßrichtung gepolt (siehe Abb. 45). Die Sperrschicht wurde von Ladungsträgern überschwemmt und ist durchlässig - sie ist in Durchlaßrichtung geschaltet.

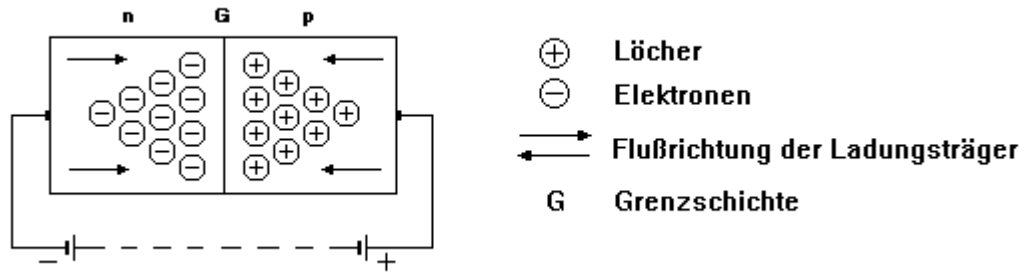


Abb. 45
pn-Übergang in Durchlaßrichtung

Wenn man die Polung vertauscht, also den Pluspol am n-Leiter und den Minuspol am p-Leiter anschließt, wird der sich im n-Leiter befindliche Elektronenüberschuß von den positiven Ladungen des Pluspols ausgeglichen, und die sich im p-Leiter befindlichen Löcher werden von den Elektronen des Minuspols ausgefüllt. So verarmen beide Seiten gänzlich an freien Ladungsträgern, die Sperrschicht erweitert sich, und es ist nicht möglich, daß ein Strom fließt. Der pn-Übergang ist in Sperrichtung gepolt (siehe Abb. 46).

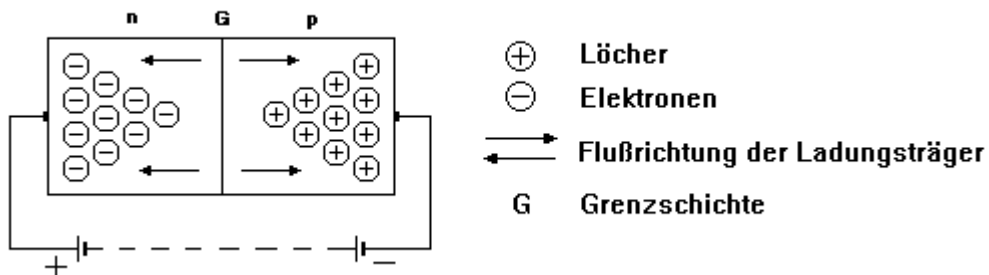


Abb. 46
pn-Übergang in Sperrichtung

7.1.3 Z-Dioden (Zenerdioden)

Die Z-Diode (Zenerdiode) wurde nach dem Entdecker des Zener-effektes C. Zener benannt.⁹⁰ Der Effekt bedeutet ursprünglich das Herauslösen von Elektronen aus dem Gitterverband des Kristalls infolge von hoher elektrischer Feldstärke (Feldemission). Dieser Effekt ist für Dioden mit einer Durchbruchsspannung von weniger als 5 Volt von vorrangiger Bedeutung. Bei höheren Zenerspannungen ist der Avalanche-Effekt maßgebend.

⁹⁰ Vgl. dazu Erwin Böhmer, Elemente der angewandten Elektronik. Braunschweig 1986, S. 36

Die Z-Diode hat einen möglichst scharfen, temperaturunabhängigen Knick in der Kennlinie (siehe Abb. 47b). Die maximale Leistung der Zenerdiode ist durch die eingezeichnete Verlusthyperbel gegeben, bei deren Überschreitung die Diode zerstört wird. Die Zenerspannung kann man durch den Grad der Dotierung in weiten Grenzen beeinflussen.

Zenerdioden werden in Sperrichtung betrieben. Bei der Zenerdiode steigt der Diodenstrom beim Erreichen einer gewissen Spannung, der sogenannten **Durchbruchsspannung** stark an. Für die Herstellung ist die optimale Oberflächenpräparation der Halbleiterchips wesentlich. Dieser starke Anstieg ist dann gewährleistet, wenn der Strom durch die Diode über den Querschnitt fließen kann. Aufgrund dieser Eigenschaft sind Zenerdioden für Stabilisierungsschaltungen besonders gut geeignet.

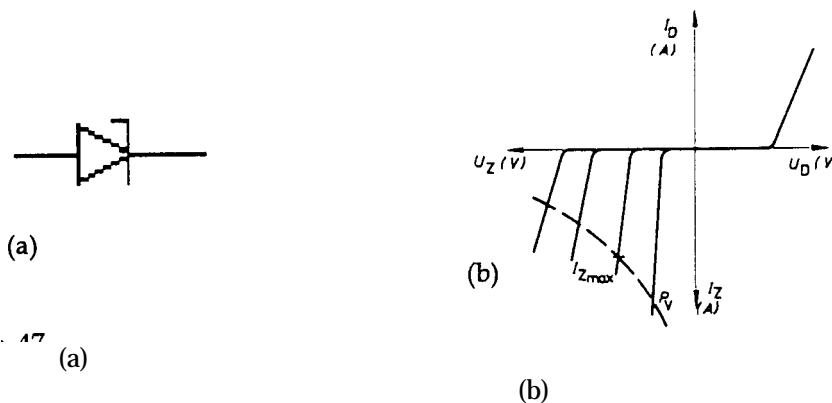


Abb. 47
 (a) Schaltzeichen der Zenerdioden⁹¹
 (b) Kennlinie: 1. Quadrant: Diode
 2. Quadrant: Z-Diode
 P_V : Verlustleistungshyperbel

7.2 Optische Halbleiterelemente

Optische Bauteile sind nicht nur als Sensoren und Kommunikationsmittel mit der Umwelt wichtig, sie sind auch sehr vielseitig und in ihrem Aufbau kompliziert. Das Bestreben, immer leistungsfähigere Logik zu entwickeln, spornt die Forscher an, optische Computer zu ersinnen, deren Daten durch Lichtleiter und optische Bauelemente verarbeitet werden. Diesen neuen Zweig der Forschung nennt man "**Photonik**".

⁹¹ Alle folgend angegebenen Schaltzeichen sind nach DIN 40700 Teil 2.

7.2.1 Fotoelemente

Zu den Fotoelementen gehören **Fotoresistor**, **Fotozelle**, **Fotodiode**, **Fototransistor** und **Fotoarray**.

Allgemein dienen Fotoelemente zur Umwandlung von Lichtimpulsen (Strahlungsimpulsen) in elektrische Impulse.⁹² Sie sind lichtempfindliche Bauelemente.

7.2.2 Fotoresistor



Abb. 48
Schaltzeichen des Fotowiderstands

Der **Fotoresistor** (LDR = Light Dependent Resistor, Lichtabhängiger Widerstand) nutzt den inneren Fotoeffekt aus. Der Fotoresistor zählt zu den "passiven" Bauteilen, da er bei Beleuchtung keine Spannung erzeugt, sondern nur seinen Widerstand ändert. Der innere Fotoeffekt tritt bei Halbleitern auf, wenn diese belichtet werden. Es vermehren sich die freien Ladungsträger, Elektronen - Löcherpaare werden mittels Ablösung von Elektronen, durch die Energie eines Lichtquanten erzeugt, und damit nimmt der Widerstand ab. Zu dem in normalen Dioden vorhandenen Sperrstrom, der durch die Ladungsträgererzeugung in der Raumladungszone hervorgerufen wird, kommt bei der Fotodiode noch ein Fotostrom hinzu. Der Fotostrom resultiert aus der durch Lichtstrahlung hervorgerufenen Trägererzeugung und steigt bei einer in Sperrichtung betriebenen Diode mit der Beleuchtungsstärke an. Der kleinste Strom stellt sich bei völliger Dunkelheit (Dunkelstrom) ein. Daher sind solche Fotoresistoren oder Fotowiderstände sehr gut für direkt auslösende Steuereinflüsse.⁹³

⁹² Vgl. dazu J. Safarik, J. Vojta, O. Radkovsky, Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik. Wien 1972, S. 138

⁹³ Zum Fotoresistor allgemein vgl. ebda

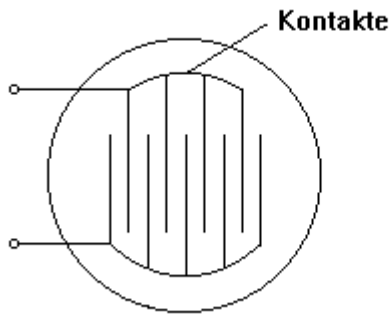


Abb. 49
Prinzipieller Aufbau eines Fotowiderstands

7.2.3 Fotodiode

Die Wirkungszone einer **Fotodiode** ist eine Sperrschicht, in der es bei der Bestrahlung mit Licht zur Erzeugung von Elektron- Lochpaaren kommt, die zum Ladungstransport beitragen. Der so generiert Foto- strom wird gemessen. Durch die Injektion von Ladungsträgern steigt die Leitfähigkeit, weil sich der Widerstand durch das einfallende Licht verändert.⁹⁴

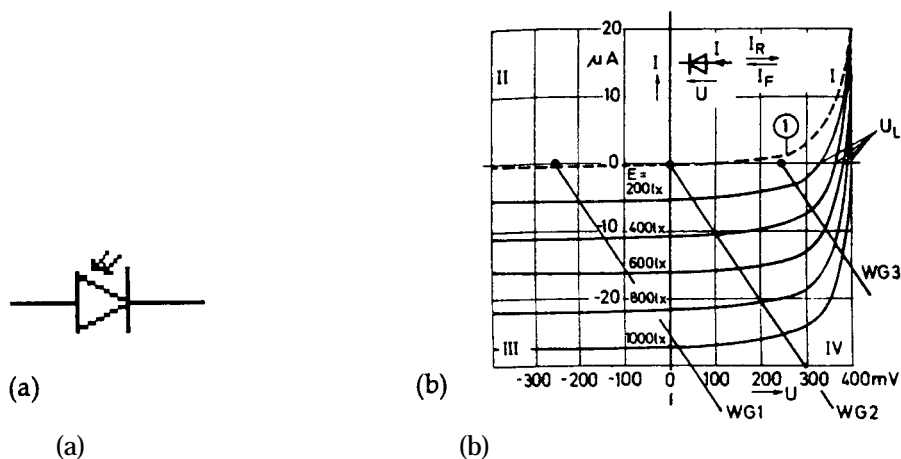


Abb. 50
(a) Schaltzeichen der Fotodiode
(b) Kennlinie: 1. Quadrant: Diodenkennlinie unter Berücksichtigung des Fotostromes
3. Quadrant: Fotodiode
4. Quadrant: Solarzelle

⁹⁴ Zur Fotodiode allgemein vgl. Erwin Böhmer, a.a.O., S. 34 und Josef Safarik, Josef Vojta, Otto- kar Radkorsky, a.a.O., S. 141 und Bergmann-Schaefer, a.a.O., S. 556

7.2.4 Fotozelle

Die **Fotozelle** (siehe Abb. 52) nützt den äußeren Fotoeffekt⁹⁵ aus, der sich auf die Eigenschaft der Alkalimetalle⁹⁶ bezieht, bei Bestrahlung mit Licht Elektronen zu emittieren. Genauer gesagt, werden in der Umgebung der Sperrschicht Ladungsträger gesammelt, wobei in der n-Schicht Elektronen und in der p-Schicht Löcher gesammelt werden. Aufgrund dessen kann ein Stromfluß über einen äußeren Widerstand stattfinden.⁹⁷

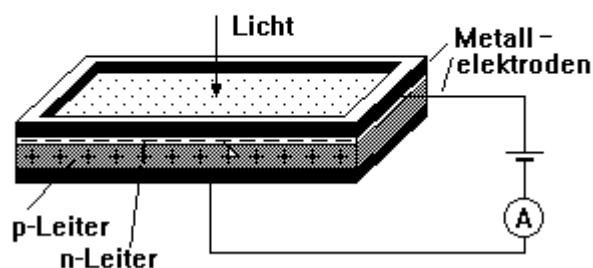


Abb. 51
Aufbau einer Sperrschichtfotozelle bzw. Solarzelle
(entnommen aus J. Schreiner, Physik 3)⁹⁸

7.2.5 Fotoarray

Zwei oder vier Fotodioden kombiniert, lassen eine Kontrolle der Position des Schwerpunktes eines Lichtflecks zu. Für solche Spezialanwendungen gibt es aber monolithisch integrierte Detektorschaltungen mit linearen und flächenhaften Anordnungen mehrerer Empfänger. Sie werden für Längenmessungen und zur Bildauswertung eingesetzt. Die Weiterentwicklung dieser Arrays sind jene heute in Videokameras angewendete Kamerabausteine.

⁹⁵ Der äußere Fotoeffekt wird auch mit Fotoemission bezeichnet.

⁹⁶ Zu den Alkalimetallen gehören zum Beispiel Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium und Cäsium, wobei die Ionisierungsenergie mit steigender Ordnungszahl sinkt.

⁹⁷ Zur Fotozelle allgemein vgl. Erwin Böhmer, a.a.O., S. 106

⁹⁸ Vgl. dazu J. Schreiner, Physik 3 für die Oberstufe der allgemeinbildenden höheren Schulen. Wien 1991

7.2.6 Solarzelle

Eine Solarzelle entspricht einer als Spannungsquelle betriebenen Halbleiterfotozelle, die den Fotospannungseffekt ausnützt. Durch das auf den pn-Übergang fallende Licht (Photonen) entstehen Ladungsträgerpaare. Jedes absorbierte Photon erzeugt ein Elektron und ein Loch. Durch einen wesentlich großflächigeren pn-Übergang kommt es durch die Umwandlung von Strahlungsenergie in der Sperrschicht zur Generation von Ladungsträgerpaaren. Durch das in der Sperrschicht herrschende Feld werden Elektronen in die n-dotierte Zone und Löcher in die p-dotierte Zone getrieben, und so entsteht außen an den Klemmen zwischen n- und p-Zone eine Spannung.⁹⁹

7.2.7 Fototransistor

Der Fototransistor (siehe Abb. 51) arbeitet ähnlich wie eine Fotodiode, jedoch mit etwa 5 -10 facher Empfindlichkeit. Beim Beleuchten der Basis-Kollektor-Sperrschicht wird diese wie bei der Fotodiode abgebaut, wodurch der Basis-Kollektor-Strom eingeleitet wird, der einen Emitter-Basis-Strom zur Folge hat. Dieser löst schließlich einen verstärkten Emitter-Kollektor-Strom aus.¹⁰⁰



Abb. 52
Schaltzeichen des Fototransistors

⁹⁹ Zur Solarzelle allgemein vgl. Helmut Stoiber, Grundlagen der elektrischen Schaltungstechnik. Eine umfassende Darstellung der Schaltungsentwicklung mit modernen Halbleiterbauelementen. Franzis-Arbeitsbuch, München 1992, S. 18 und Bergmann-Schaefer, a.a.O., S 548

¹⁰⁰ Zum Fototransistor allgemein vgl. Erwin Böhmer, a.a.O., S. 246

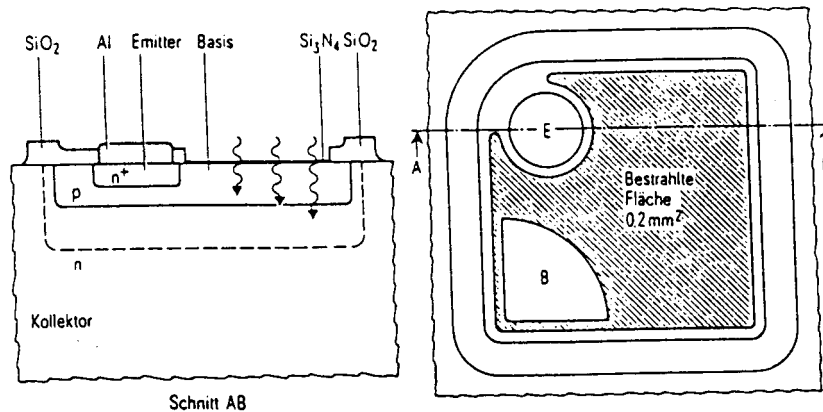


Abb. 53
 Aufbau eines Phototransistors
 (entnommen aus W. Heywang, R. Müller, Halbleiter-Elektronik)

7.2.8 Lumineszenzdiode



Abb. 54
 Schaltzeichen einer Lumineszenzdiode

Jeder in Durchlaßrichtung betriebene pn-Übergang wirkt wie eine **Lumineszenzdiode** (LED = light emitting diode), sofern die Rekombination im Übergangsbereich der aktiven Schicht strahlend erfolgt. Die Lumineszenzdiode zeichnet sich durch hohe Zuverlässigkeit, kleine Abmessungen, leichte Modulierbarkeit und hohe Strahldichte aus. Daher finden sie vielfach Verwendung in der Sensortechnik. Die üblichen Bauformen (siehe Abb. 55) sind der **einfache Flächenemitter**, die **Burrus-Diode** und der **Kantenemitter**. Bei den einfachen Flächenemittern kann nur ein Bruchteil von wenigen Prozent der erzeugten Strahlung die Kristalloberfläche verlassen, der Rest wird durch Totalreflexion in den Kristall zurückgeworfen. Die Burrus-Diode hat eine besonders hohe Strahldichte und kann daher mit Hilfe geeigneter Linsen verwendet werden, um Licht in eine in Multimodeglasfasern einzukoppeln. Beim Kantenemitter ist es ähnlich wie bei der Burrus-Diode, nur ist die Feldverteilung nicht rotationssymmetrisch, sondern flächenhaft.¹⁰¹

¹⁰¹ Weiterführendes zur Lumineszenzdiode siehe Herbert Freyhardt, Franz Ulrich Hillebrecht u.a., a.a.O., S. 650 und W. Heywang, R. Müller, a.a.O., S. 26 und Helmut Stoiber, a.a.O., S 19

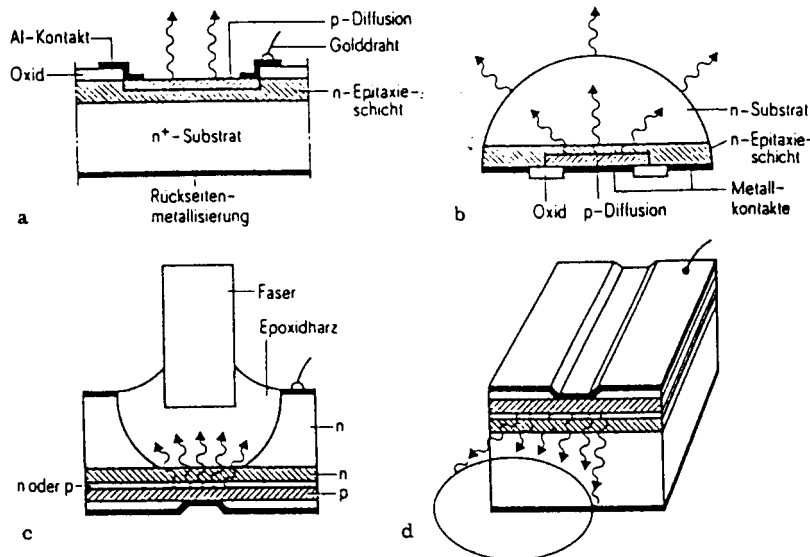


Abb. 55

Bauformen von Lumineszenzdioden

- a) einfacher Flächenemitter
- b) Demostruktur des einfachen Flächenemitters zur Vermeidung der großen Verluste
- c) Burrus - Diode
- d) Kantenemitter

(entnommen aus W. Heywang, R. Müller, Halbleiter-Elektronik)

7.2.9 Laserdiode

Bei Laserdioden wird die Inversion des Besetzungszustandes durch starke Dotierung und Trägerinjektion des pn-Übergangs bewirkt, sodaß eine stimulierte Emission einsetzen kann. Solche stark dotierten Halbleiter werden auch als "entartete Halbleiter" bezeichnet.

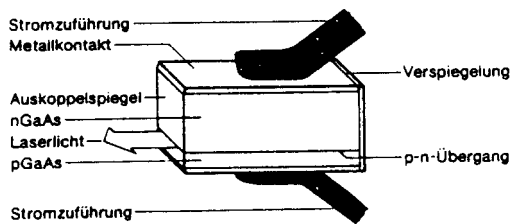


Abb. 56

Schematische Darstellung einer Laserdiode

Halbleiterlaser:

Eine etwas größere Form der Laserdiode ist der Halbleiterlaser. Die Ideen zum Bau eines Halbleiterlasers hatten N.G. Basov, B.M. Wul und J.N. Popov im Jahre 1959. Dem folgte die Realisierung eines Cadmiumsulfid-Lasers durch N. B. Basow 1963.

Für die Wissenschaft und die Technik stellte die von Lasern erzeugte Strahlung ein sehr wertvolles Experimentier- und Arbeitsmittel dar. Aufgrund des hohen Kohärenzgrades¹⁰², der extremen Energiedichte und der kurzen Lichtimpulse ist es möglich, neue Erkenntnisse und Anwendungen bei der Wechselwirkung von Licht und Materie zu erlangen.¹⁰³ Als Beispiel der vielseitigen Anwendung des Halbleiterlasers sei hier die optische Abtastung von Daten in CD-Playern erwähnt.

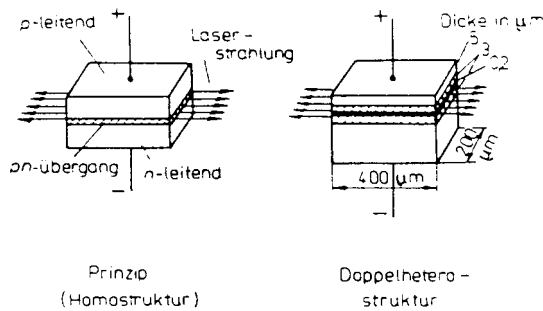


Abb. 57
Schematische Darstellung eines Injektionslasers (Halbleiterlasers)
(entnommen aus M. van Ardenne, Effekte der Physik und ihre Anwendung)

7.3 Transistoren

7.3.1 Die erste Generation von Transistoren

Früher wurden sogenannte "legierte Transistoren" erzeugt. Das sind rechteckige oder kugelförmige Kristallplättchen, denen auf beiden Seiten kleine Kügelchen, die aus einem Indiumband ausgestanzt wurden, eingelegt sind. Dabei bildet das Indium die p-leitenden Schichten. Die Kombination aus Germanium-Plättchen, Indiumpillen, Zinnring und Basisblech (siehe Abb. 58) kommt in eine Form und mit ihr in einen Legierofen.

Im Ofen wird das Transistorsystem unter Schutzgas-Atmosphäre erhitzt, und die Indiumpillen werden durch das Schmelzen einlegiert. Zusätzlich schmilzt der Zinnring und verlötet damit das Halbleiterplättchen und das Basisblech. Nach diesem Vorgang wird das Transistorsystem noch gebeizt und gewaschen und ist dann zum Einbau in das Gehäuse fertig.¹⁰⁴

¹⁰² "Kohärenz" kommt aus dem Lateinischen und bedeutet, daß das emittierte Licht eine konstante Phasenbeziehung besitzt.

¹⁰³ Weiterführende Literatur zum Laser, siehe Manfred van Ardenne, a.a.O., S. 557

¹⁰⁴ Zu den legierten Transistoren vgl. Transistorkompodium. Teil I, Grundlagen. Valvo, Hamburg 1967, S. 16

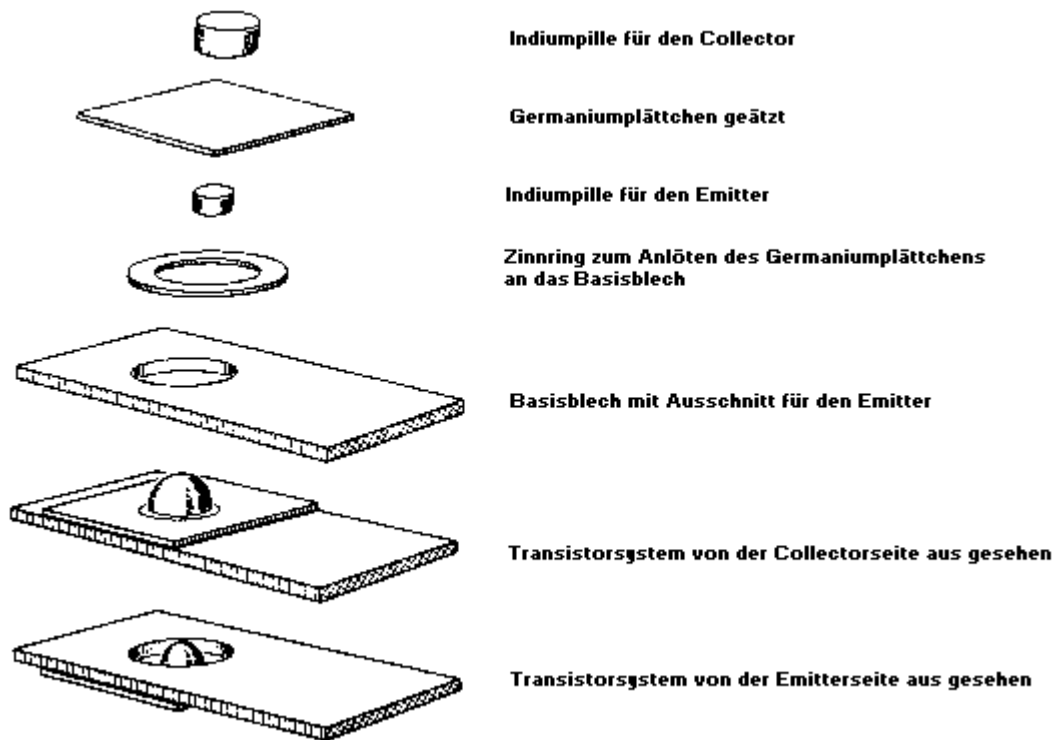


Abb. 58

Systemaufbau eines alten pnp-Transistors. Oben sind die Teile gezeigt, aus denen das System besteht: die beiden zylinderförmigen, aus Blechstreifen ausgestanzten Indiumpillen, das Germanium-Plättchen, das Basisblech und der zum Löten benötigte Zinnring. Unten ist das System einmal von der Kollektorseite und einmal von der Emitterseite zu sehen, wie es aus dem Leigerofen kommt.

(entnommen aus Telefunken-Fachbuch, Der Transistor I)

Aus Abb. 58 sind die deutlichen Größenunterschiede der Grenzflächen erkennbar, die aus zwei Gründen notwendig sind:

“1. Der den Transistor durchfließende Strom ist, wie der Strom auch sonst, eine Ladungsträger-Drift. Die Ladungsträger gehen von der Emitterzone nach der Kollektorzone. Hierbei sollen sich auf dem mittleren Bereich der Grenzfläche zwischen Basiszone und Kollektorzone treffen, damit ihre Wege in der Basiszone möglichst kurz ausfallen. Das erreicht man, indem man die Kollektorgrenzfläche nach allen Seiten größer macht als die Emittergrenzfläche.

2. Im Betrieb liegt zwischen Basis und Kollektor im allgemeinen eine weit höhere Spannung als zwischen Emitter und Basis. Der Emitterstrom und der Kollektorstrom hingegen haben fast gleiche Werte. Daraus folgt, daß auf die Grenze zwischen Kollektor und Basis eine größere elektrische Leistung entfällt als auf die Grenze zwischen Emitter und Basis. Beide Leistungen setzen sich in Wärme um. An der Grenze zwischen Kollektor und Basis entsteht folglich etwas mehr Wärme als an der Grenze zwischen Emitter und Basis.“¹⁰⁵

¹⁰⁵ Der Transistor I, Grundlagen Kennlinien Schaltbeispiele, 7. Auflage, S. 14

“colligere” (sammeln). Gegebenenfalls kann es noch einen vierten Anschluß geben, der mit dem Gehäuse verbunden ist.

Transistoren werden nicht aus zwei separaten pn-Elementen hergestellt, die zusammengefügt werden, sondern durch das Dotieren verschiedener Zonen eines einzigen Halbleitereinkristalls gewonnen. Für die Funktion ist es sehr wichtig, daß die Basisschicht schwach dotiert und extrem dünn ist, damit der Transistor brauchbare Eigenschaften erhält. Bei Transistoren ist der pn-Übergang zwischen Emitter und Basis in Durchlaßrichtung und der Übergang von Basis zum Kollektor in Sperrichtung gepolt. Der Leitungsmechanismus eines Transistors läßt sich anhand eines Funktionsmodells annähernd in drei Schritten erklären.

1. Es wird nur die in Durchlaßrichtung gepolte Spannung von der Basis zum Emitter angelegt. Diese hat einen relativ hohen Durchlaßstrom zur Folge. Dieser resultierende Stromfluß setzt sich aus dem im n-dotierten Emitter fließenden Elektronenstrom und aus dem in der p-dotierten Basis fließendem Löcherstrom zusammen.
2. Es wird nur die in Sperrichtung gepolte Spannung vom Kollektor zur Basis angelegt. Wie bei einer Diode, die in Sperrichtung gepolt ist, fließt ein sehr geringer Sperrstrom, der sogenannte Kollektor-Basis-Reststrom.
3. Es werden beide Spannungen gleichzeitig angelegt. Die aus der Emitterschicht in die Basisschicht vorgedrungenen Elektronen können in zwei Richtungen abwandern, denn sowohl an der Basis als auch am Kollektor liegt ein positives Potential gegenüber dem Emitter. Der weitaus größere Anteil der in die Basis eingedrungenen Elektronen wird vom höheren Potential des Kollektors angezogen. Nur ein kleiner Anteil fließt zum kleineren Potential an der Basis ab. Der Transistor eignet sich somit zur Stromverstärkung. Die Steuerung erfolgt durch eine Basisstromänderung, für die nur kleine Steuerströme nötig sind.

Der wichtige Mechanismus besteht darin, daß die aus der Emitterzone in die Basiszone gelangenden Ladungsträger durch die dünne Basiszone hindurchdiffundieren können und vom Kollektor trotz Sperrspannung gesammelt werden. Der Strom fließt also nicht über die Basis ab, sondern wird vom Kollektor aufgenommen. Der Effekt wird nur von einer geringfügigen Rekombination an der Basis gestört.

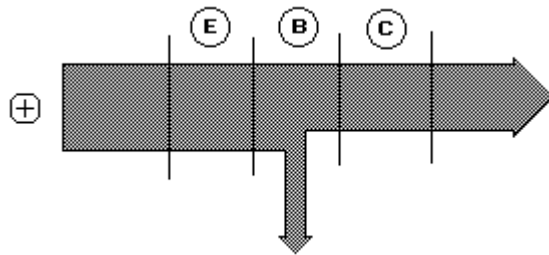


Abb. 60
Schematische Darstellung des Stromflusses bei einem pnp-Transistor
(entnommen aus Transistor-Kompendium Teil I)



Abb. 61
Schaltbild des pnp und npn-Transistors
Der Emitter ist, je nach Art des Transistors, mit einem Pfeil gekennzeichnet. Dieser zeigt in die jeweilige Stromrichtung, beim npn-Transistor nach außen und beim pnp-Transistor nach innen.

Das **Schaltzeichen** (siehe Abb. 61) braucht keine Auskunft über den Aufbau des Bauteiles zu geben, sondern nur über die Arbeitsweise einer Schaltung. In manchen alten Schaltbildern ist der Transistor noch mit einem Kreis umzeichnet, heute ist der Kreis nach Norm unzulässig. Je nach Lage und Steuerung des Transistors wird die Basis bei Steuerung über die Basis senkrecht und bei Steuerung über den Emitter waagrecht gezeichnet.

Das Transistorgehäuse ist je nach geforderter Leistung und Anwendung verschieden. Ein für eine geringe Leistung ausgelegter Transistor besitzt in der Regel ein kleines Gehäuse. Dabei ragen die Anschlußdrähte aus der Bodenplatte heraus. Gehäusetypen, Anschlußbelegung und Anschlußgeometrie folgen den jeweils zuständigen Normen.

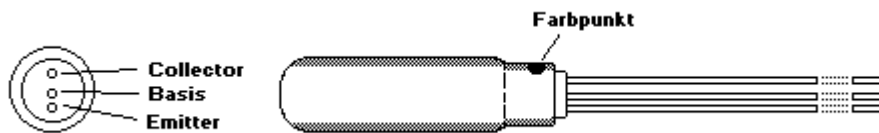


Abb. 62
 Ansicht eines älteren Kleinleistungs- NF-Transistors in einem Kunststoffgehäuse mit seinen Anschlüssen
 (entnommen aus Telefunken-Fachbuch, Der Transistor I)

Bei Transistoren, die für stärkere Leistungen eingesetzt werden, umschließt man das Metallgehäuse mit einer gut wärmeleitenden Metallschelle, die zur Wärmeableitung dienen soll. Die Wärme soll auf die angeschraubte Metallschelle, die als Kühlfahne (siehe Abb. 63) oder Kühlfläche bezeichnet wird, übergehen und so zur Kühlung dienen. Ist diese Maßnahme zu wenig, so verwendet man Kühlkörper¹⁰⁶, Ventilatoren oder Peltier-Kühleinrichtungen. Der Transistor ist in trockene Luft, die die Wärmeabgabe unterstützen soll, eingeschlossen.

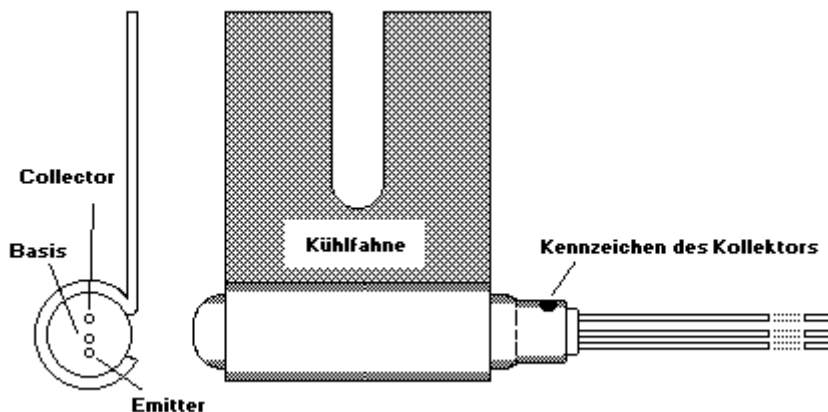


Abb. 63
 Ansicht eines älteren Transistors mit Kühlfahne. Die Kühlfahne wird flach auf das Chassisblech des Geräts aufgeschraubt und vermittelt so einen guten Wärmeübergang vom Transistor auf das Chassis. Oft wird der Kollektoranschluß auch noch zusätzlich mit einem Farbpunkt, durch Färbung des Drahtes, durch seine übermäßige Länge oder durch eine Metallasche gekennzeichnet.
 (entnommen aus Telefunken-Fachbuch, Der Transistor I)

¹⁰⁶ Zu Kühlkörpern vgl. auch Abb. 39

7.3.3 Grundsaltungen

Die Anwendung des Transistors als Schalter oder Verstärker unterscheidet sich prinzipiell nicht. Spezielle Transistortypen mit höherer Verstärkung und daher auch größerer Streuung der Daten werden bevorzugt für Schaltzwecke verwendet. Der Vorteil der Anwendung von Schalttransistoren, abgesehen von der jeweiligen Schaltung, ist eine schnelle Schaltzeit und ein geringer Leistungsverbrauch. Die Anforderungen an den Verstärkertransistor unterteilt man je nach verwendetem Frequenzbereich. Grob werden Transistoren in Niederfrequenztransistor (Audiobereich), Hochfrequenztransistor, Transistoren für extreme Frequenzen und Spezialtransistoren (z.B.: Darlingtontransistoren, Transistorpaare) unterteilt.

Der für den Transistor neben dem Typ (nnp oder pnp) wichtigste Parameter ist der Verstärkungsfaktor. Er ist neben der Grenzfrequenz in allen Listen aufgeführt. Man unterscheidet Gleich- und Wechselfspannungsverstärkung, die sich aber nicht wesentlich unterscheiden. Die Änderung des Basisstromes multipliziert mit dem Verstärkungsfaktor ergibt die Änderung des Kollektorstroms. Der Transistor ist also ein Stromverstärker. Die Linearität der Stromverstärkungskennlinie ist ein Hinweis auf die Qualität der Verstärkung.

Für den jeweiligen Anwendungszweck gibt es ausgeklügelte Schaltvarianten. Prinzipiell unterscheidet man drei Grundsaltungen von Transistoren, diese sind jeweils nach der im Ein- und Ausgangskreis gemeinsamen Elektroden benannt. Jede dieser Varianten hat ihre besonderen Vor- aber auch Nachteile.¹⁰⁷

Emitterschaltung:

Ihre Hauptanwendungsgebiete liegen in der Strom- und Spannungsverstärkung. Das verstärkte Ausgangssignal ist 180° phasenverschoben. Aufgrund dieser Phasenlage wird die einstufige Emitterschaltung auch als "invertierender Verstärker" bezeichnet. Der Eingangswiderstand ist kleiner als der Ausgangswiderstand. Die Strom- und Spannungsverstärkungen sind groß. Die Leistungsverstärkung ist daher ebenfalls groß, ein Nachteil der Schaltung ist die geringe Grenzfrequenz. Bei dieser Schaltung ist der Emitteranschluß der gemeinsame Punkt für den Eingangs- und Ausgangskreis, daher der Name Emitterschaltung.

¹⁰⁷ Zu den verschiedenen Schaltungen vgl. Helmut Stoiber, a.a.O., S. 27

Basisschaltung:

Sie ist wegen der geringen Eingangskapazität überwiegend in HF-Schaltungen¹⁰⁸ zu finden. Die Basisschaltung liefert eine große Spannungsverstärkung. Ihr Eingangswiderstand ist kleiner als der Ausgangswiderstand.

Kollektorschaltung:

Sie hat einen sehr großen Eingangswiderstand, der einem kleinen Ausgangswiderstand gegenübersteht. Daher eignet sich diese Schaltung hervorragend zur Impedanzumwandlung. Die Kollektorschaltung ermöglicht eine gute Koppelung zwischen hoch- und niederohmigen Stufen, ohne die Eingangsstufe wesentlich zu belasten.

Schaltung	Emitterschaltung	Basisschaltung	Kollektorschaltung
Eingangswiderstand	10 Ω ... 10 k Ω (mittel)	einige zehn Ω $\frac{1}{\beta}$ -x Wert für Emitterschaltung	einige hundert k Ω (groß) β x Lastwiderstand
Ausgangswiderstand	einige zehn k Ω (groß)	einige hundert k Ω (sehr groß) β x Wert für Emitterschaltung	einige zehn bis hundert k Ω (klein) $\frac{1}{\beta}$ -x Generator - Innenwiderstand
Stromverstärkung (schaltungsbezogen)	10 ... 200 fach	etwas kleiner als 1	10 ... 200 fach
Spannungsverstärkung (schaltungsbezogen)	einige hundert- bis einige tausendfach	einige hundert- bis einige tausendfach	etwas kleiner als 1
Leistungsverstärkung	etwa 10 ³ ... 10 ⁴ fach	etwa 10 ² ... 10 ³ fach	10 ... 200 fach

Abb. 64

Überblick über die Eigenschaften der drei Transistor-Signal-Grundsaltungen

(β ist die Stromverstärkung)

(entnommen aus Telefunken - Fachbuch, Der Transistor I)

¹⁰⁸ "HF-Schaltung" heißt Hochfrequenzschaltung.

7.3.4 Kennlinien des Transistors

Da beim Transistor drei Ströme und drei Spannungen zueinander in Beziehung gebracht werden können, gibt es eine Vielzahl von Kennliniendarstellungen. In der Praxis zieht man jene vor, die sich auf die Emitterschaltung beziehen. Um die Wirkungsweise zu verstehen, wird in Lehrbüchern die sogenannte Vierquadranten-Darstellung verwendet. In den Datenblättern werden nur jene Kennlinien gezeichnet, die man zur Dimensionierung von Schaltungen benötigt.¹⁰⁹

1. Quadrant: Ausgangskennlinienfeld

Dieses Kennlinienfeld bildet das für die Beurteilung des Transistorverhaltens und die Bemessung von Schaltungen wichtigste Diagramm. Das Ausgangskennlinienfeld zeigt die Abhängigkeit des Kollektorstroms von der Kollektor-Emitter-Spannung, wobei sich je nach dargestelltem Basisstrom mehrere Kennlinien ergeben. Hierbei wird der Basisstrom auf einem bestimmten Wert konstant gehalten, und je Wert ergibt sich eine Ausgangskennlinie. Die Meßschaltung, um ein Ausgangskennlinienfeld zu messen, ist in der Abbildung zu sehen.

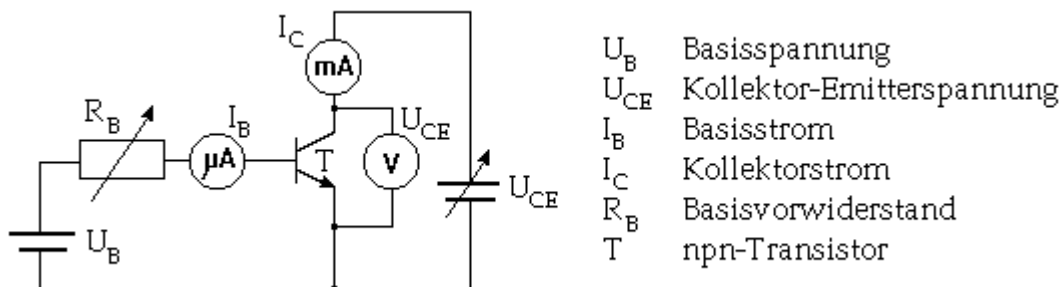


Abb. 65
Meßanordnung zur Aufnahme eines Ausgangskennlinienfeld

Zur Einhaltung der zulässigen Belastung eines Transistors wird in das Ausgangskennlinienfeld die Leistungshyperbel eingetragen. Wenn der Arbeitspunkt eines Transistors im verbotenen Bereich liegt, wird der Transistor infolge von Überhitzung zerstört.

2. Quadrant: Stromsteuerkennlinie

Die Stromsteuerkennlinie zeigt die Abhängigkeit des Kollektorstroms vom Basisstrom eines Transistors. Die Stromsteuerkennlinie läßt erkennen, daß die Abhängigkeit des Kollektorstroms vom Basisstrom nahezu linear ist.

¹⁰⁹ Zu den Kennlinienfeldern vgl. Der Transistor I. Grundlagen, Kennlinien, Schaltbeispiele. 3. Aufl. Franzis-Arbeitsbuch, München 1962, S. 35

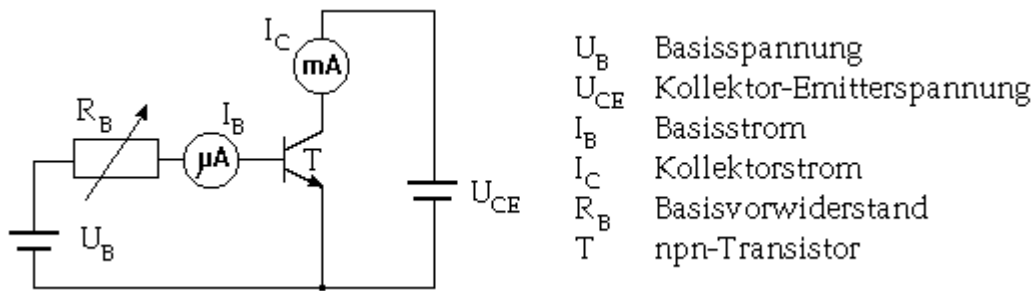


Abb. 66
Meßanordnung zur Aufnahme einer Stromsteuerkennlinie

Wenn man eine möglichst gleichmäßige und verzerrungsfreie Übertragung des Transistors erzielen möchte, steuert man den Transistor mit einem veränderlichen Strom an. Man spricht dabei von Stromsteuerung. Im Gegensatz zur Stromsteuerung treten bei der Spannungsteuerung unter Umständen Verzerrungen auf.

3. Quadrant: Eingangskennlinienfeld

Das Eingangskennlinienfeld zeigt die Abhängigkeit des Basisstroms von der Basis-Emitter-Spannung. In Emitterschaltung wird der Transistor zwischen Basis und Emitter gesteuert, das heißt, genauer gesagt, durch die Höhe der Basis-Emitter-Spannung wird er in seinem Widerstandsverhalten beeinflusst. Daher wird die Basis-Emitter-Strecke als Eingang bezeichnet und die Emitter-Kollektor-Strecke als Ausgang. Da der Eingang grundsätzlich in Durchlaßrichtung geschaltet ist, wird die Eingangskennlinie nur für den Durchlaßzustand gemessen. Auch die Kollektor-Emitter-Spannung nimmt Einfluß auf den Eingang und muß daher konstant gehalten werden. Sie wird in der Kennlinie als Parameter (eine während der Messung konstant bleibende Größe) vermerkt.

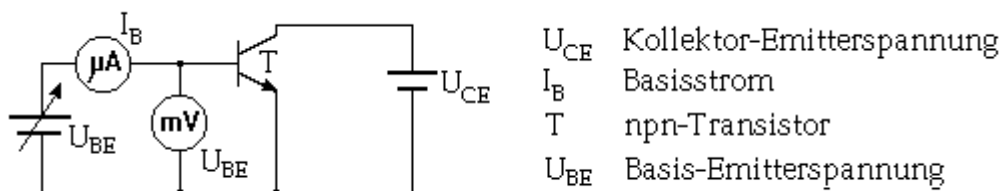


Abb. 67
Meßanordnung zur Aufnahme eines Eingangskennlinienfeldes

4. Quadrant: Rückwirkungskennlinie

Die Rückwirkungskennlinie gibt den Zusammenhang zwischen Basis-Emitter- und Emitter-Kollektor-Spannung an. Als Parameter wird meist der Basisstrom gewählt. Durch die hohe Empfindlichkeit und die hohe Verstärkung kann aus diesem Teil keine gute Information für die Berechnung von Schaltungen entnommen werden. Diese Kennlinienschar hat eher Übersichtscharakter.

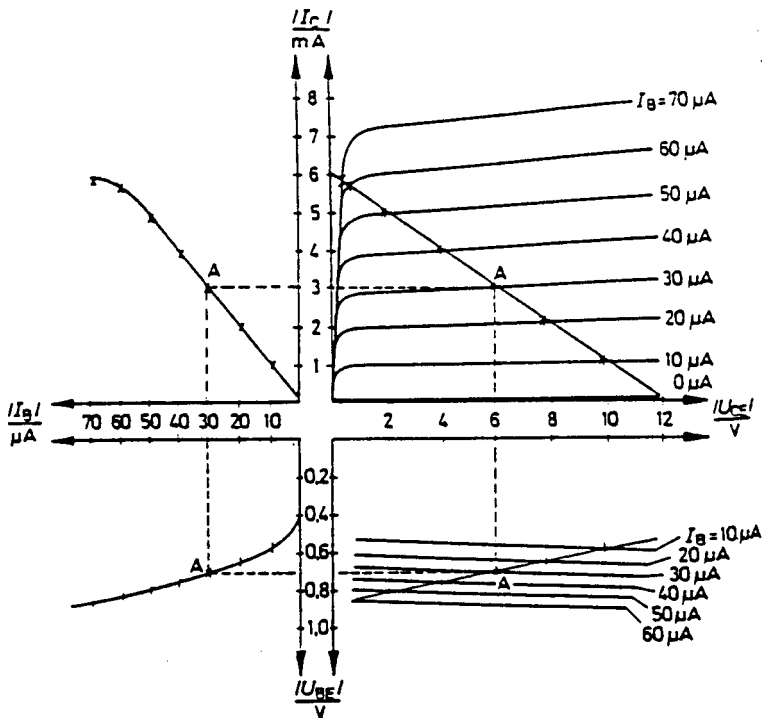
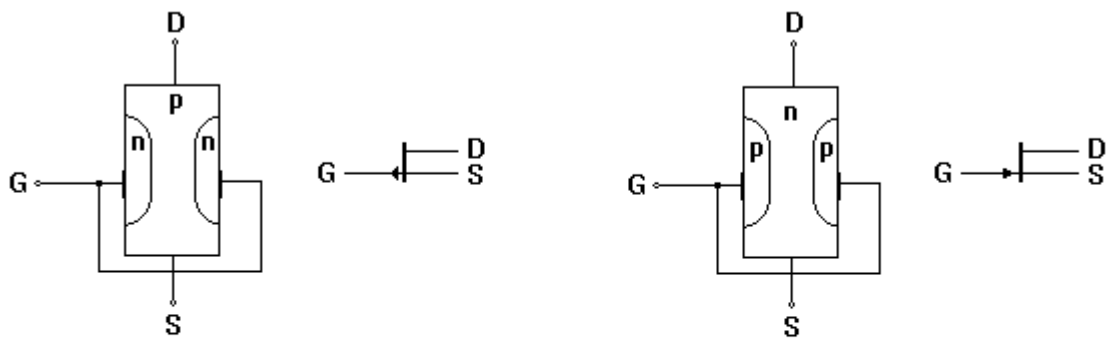


Abb. 68
Darstellung des Vierquadrantenkennlinienfeldes eines Transistors mit Lastenwiderstandsgeraden, I_C - I_B -Betriebskennlinien, U_{BE} - I_B -Betriebskennlinie und Rückwirkungsgerade

7.4 Der Feldeffekttransistor

Im Gegensatz zu den bipolaren Transistoren werden Feldeffekttransistoren, kurz FET, durch ein elektrisches Feld gesteuert. Alle Feldeffekttransistoren und auch der Unijunctions-Transistor sind unpolare Transistoren. Das bedeutet, es sind Transistoren mit gleichgepolten pn-Übergängen. Ihren Einsatz finden sie bevorzugt als Anpassungselemente von hochohmigen zu niederohmigen Stufen. Ihr Vorteil ist, daß sie sehr rauscharm sind, jedoch ein großer Nachteil ist die herstellungsbedingte starke Exemplarstreuung, die fast immer einen Abgleich an fertigen Schaltungen erfordert.¹¹⁰

¹¹⁰Zu Feldeffekttransistoren allgemein vgl. Helmut Stoiber, a.a.O., S. 49 und Bergmann-Schaefer, a.a.O., S. 571



Bezeichnungen FET/Transistor:

Gate	- G - Tor	- Basis	- Gitter
Drain	- D - Abfluß	- Kollektor	- Anode
Source	- S - Quelle	- Emitter	- Kathode

Abb. 69

Schematischer Aufbau, Schaltzeichen und Bezeichnungen des FET. Die Bezeichnungen bzw. die Anschlüsse sind im Vergleich mit dem Transistor dargestellt.

Das Gate dient als Steuerelektrode für die elektrische Leitfähigkeit zwischen Drain und Source. Daher kann man den Feldeffekttransistor als einen steuerbaren Widerstand ansehen.

Man unterscheidet mehrere Arten von Feldeffekttransistoren:

Junction Field Effect Transistor (JFET)

Metal-Oxid-Semiconductor-FET (MOSFET)

7.4.1 Junction Field Effect Transistor

Junction Field Effect Transistor (Sperrschicht-Feldeffekt-Transistoren) werden als n- oder p-Kanal Typen gebaut. Beim JFET erfolgt die Widerstandsveränderung von Drain und Source durch die Variation der Kanalbreite. Durch Raumladungszonen im pn-Übergangsbereich wird die Breite des Kanals beeinflusst und damit die Leitfähigkeit zwischen Drain und Source.

Ein FET besteht aus einer n- oder p-leitenden Kristallstrecke, in der gegenteilig leitende Zonen eindotiert sind. Dabei entstehen zwei pn-Übergänge, welche in Sperrichtung gepolt werden. Es bilden sich zwei Sperrschichten in der Raumladungszone, die mit steigender Spannung größer werden und so den Kanal einschnüren (siehe Abb. 70) und damit das Fließen des Stroms verhindern.

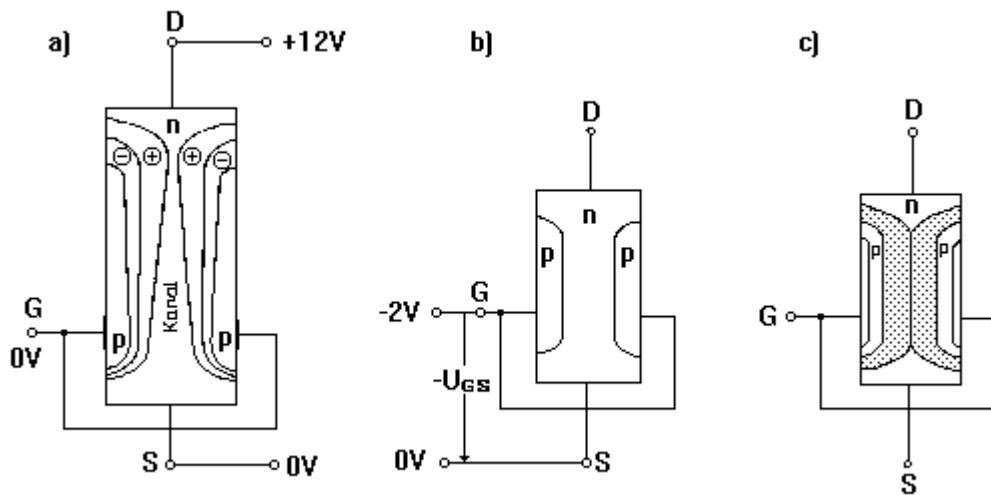


Abb. 70
 Schematische Reaktion des FETs in verschiedenen Schaltungen
 Bild a) zeigt die Lage des Kanals eines Sperrschicht-FET
 Bild b) zeigt die Polung der Steuerspannung U_{GS}
 Bild c) zeigt die Sperrschichten bei Sperrzustand

Der Sperrschicht-Feldeffekttransistor zeichnet sich durch seine leistungsarme Steuerung des Stromflusses aus.

7.4.2 Metal - Oxid - Semiconductor - FET (MOSFET)

Der Name dieser Art von Feldeffekttransistoren steht direkt in Bezug auf ihrem Aufbau. MOS, Metal-Oxid-Semiconductor, bedeutet Metall Oxid Halbleiterbauteil, wobei der Halbleiter- Metallübergang ähnliche Eigenschaften wie ein pn-Übergang hat.

Dieser Transistor besteht aus einem p-leitenden Kristall, dem sogenannten "Substrat". In dieses Substrat werden zwei n-leitende Schichten dotiert. Der Kristall wird mit einer Abdeckschicht aus hochisolierendem SiO_2 bedeckt, und drei oder vier Elektroden werden aufgedampft. MOS-Transistoren haben oft einen vierten Anschluß, das Substrat (Bulk). Von der Wirkung dieses Anschlusses wird selten Gebrauch gemacht. Er wird daher entweder mit der Sourcelektrode oder mit dem Gehäuse verbunden.

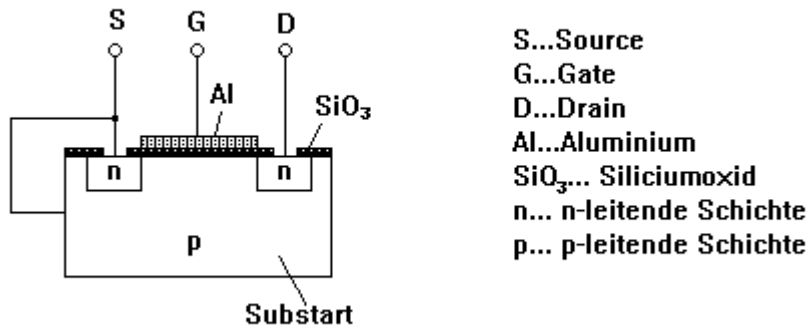


Abb. 71
Schematischer Aufbau eines MOS-FET (n-Kanal-Anreicherungstyp)

7.4.3 Die vier Arten des MOSFETs:

- **Selbstsperrender Typ (Anreicherungstyp) n - Kanalausführung**
Dieser FET weist bei einer Gate-Source-Spannung von Null keinen leitfähigen Kanal auf, der Transistor ist selbstsperrend. Nur ein geringer Reststrom kann fließen. Erhöht man die Spannung, so steigt die Elektronenkonzentration im p-dotierten Substrat, und es entsteht ein leitender n-Kanal.
- **Selbstsperrender Typ (Anreicherungstyp) p - Kanalausführung**
Vom Arbeitsprinzip arbeitet der p-Kanal FET gleich wie der n-Kanal FET. Nur wird an das n-Substrat eine negative Spannung angelegt, und es entsteht ein leitender p-Kanal.
- **Selbstleitender Typ (Verarmungstyp) n - Kanalausführung**
- **Selbstleitender Typ (Verarmungstyp) p - Kanalausführung**
Diese Typen unterscheiden sich nur dadurch, daß bereits vor angelegter Steuerspannung ein leitfähiger Kanal besteht. Durch Anlegen einer Steuerspannung ändert sich je nach Drainspannung die Leitfähigkeit dieses Kanals.

In Abb. 72 sind alle vier Arten schematisch gezeigt.

7.4.4 Kennlinien

Analog zu den bipolaren Transistoren haben auch Feldeffekttransistoren Kennlinien (siehe Abb. 73), die bei Analysen von Schaltungen helfen sollen.

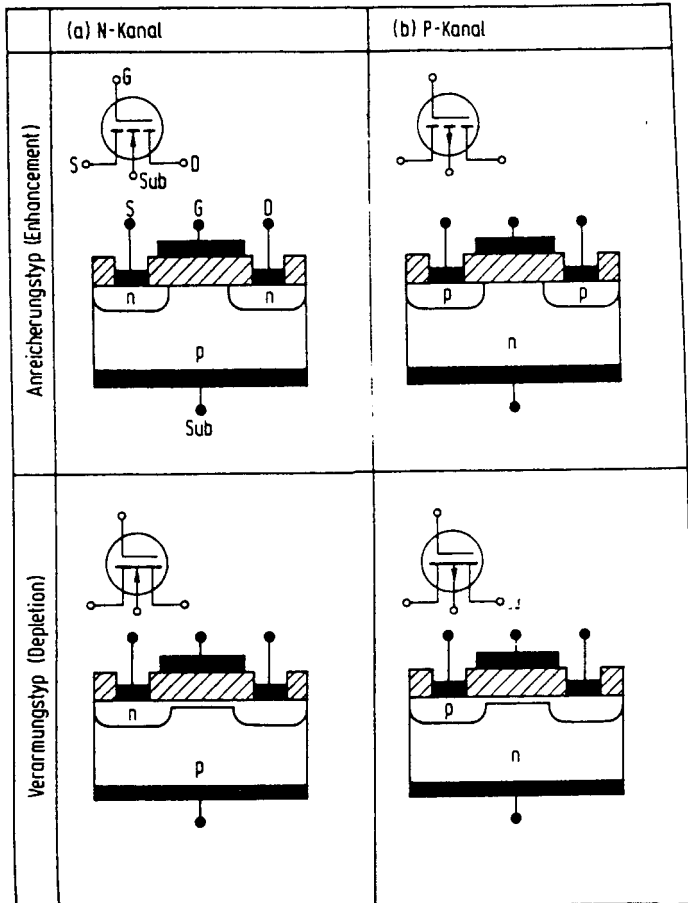


Abb. 72
Schematische Darstellung der vier Arten der MOSFETs
(entnommen aus Bergmann-Schaefer, Grundlagen der Experimentalphysik)

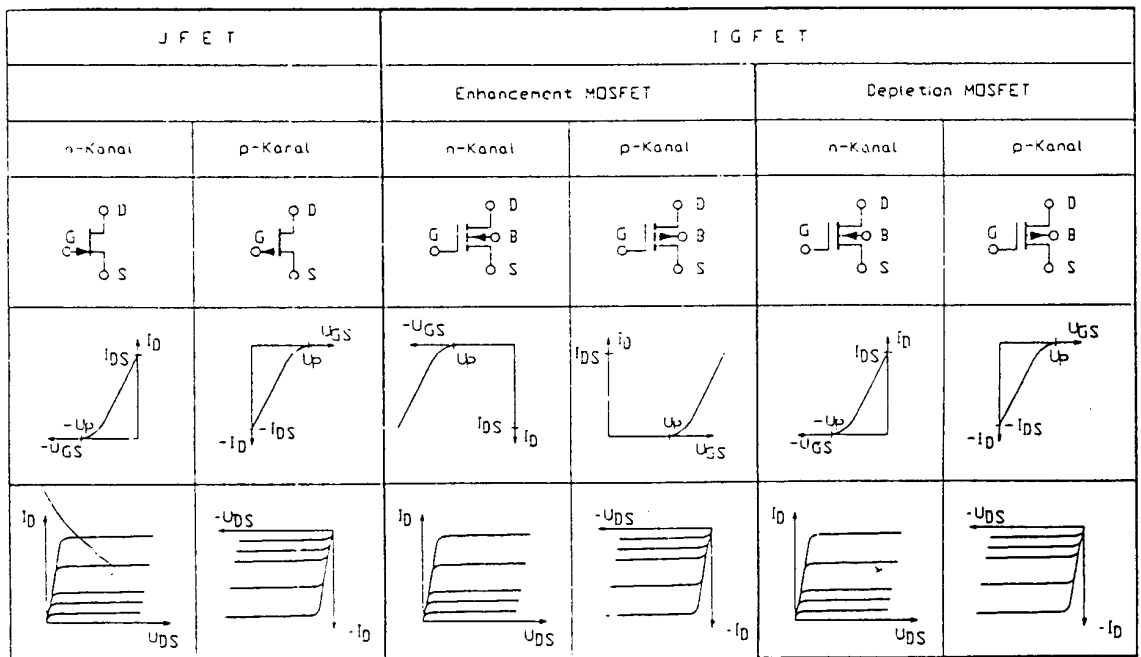


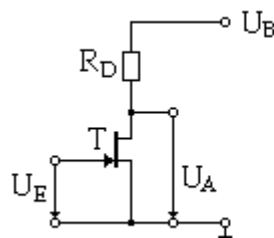
Abb. 73
Zusammenstellung der Schaltbilder und Kennlinien aller sechs FET - Typen

7.4.5 Grundsaltungen¹¹¹

Genau wie bei bipolaren Transistoren gibt es beim Feldeffekttransistor drei Grundsaltungen, die nach der gemeinsamen Anschlußelektrode des Ein- und Ausgangskreises benannt sind.

Sourceschaltung:

Diese FET-Grundsaltung (siehe Abb. 74) entspricht der Emitter-schaltung¹¹². Mit dieser Schaltung lassen sich die größten Verstärkerwerte erzielen, die jedoch nicht mit denen von bipolaren Transistoren vergleichbar sind. Die Eingangsimpedanz¹¹³ der Sourceschaltung ist sehr groß, da der pn-Übergang des Gates in Sperrichtung betrieben wird.

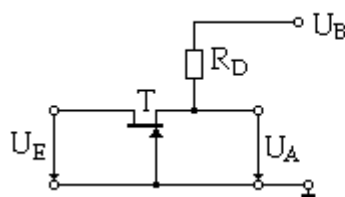


U_B	Betriebsspannung
R_D	Arbeitspunkt-widerstand
U_E	Eingangsspannung
U_A	Ausgangsspannung
T	Feldeffekttransistor

Abb. 74
FET in Sourceschaltung

Gateschaltung:

Die Gateschaltung (siehe Abb. 75) ist mit der Basisschaltung¹¹⁴ gleichzusetzen. Da aber die Eingangsimpedanz sehr klein ist und daher der entscheidende Vorteil des FET nicht zum Tragen kommt, wird diese Schaltung nur sehr selten verwendet.



U_B	Betriebsspannung
R_D	Arbeitspunkt-widerstand
U_E	Eingangsspannung
U_A	Ausgangsspannung
T	Feldeffekttransistor

Abb. 75
FET in Gateschaltung

¹¹¹ Die Grundsaltungen des FET sind analog zu denen des Transistors

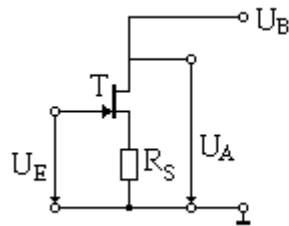
¹¹² Vgl. dazu FBA, S. 72

¹¹³ "Impedanz": elektrischer Scheinwiderstand, Wechselstromwiderstand eines Stromkreises

¹¹⁴ Vgl. dazu FBA, S. 73

Drainschaltung:

Die Drainschaltung (siehe Abb. 76) entspricht der Funktionsweise der Kollektorschaltung¹¹⁵. Sie wird auch oft als Sourcefolger bezeichnet. Die Eingangsimpedanz der Drainschaltung ist noch größer als die der Sourceschaltung. Dieser hohen Eingangsimpedanz steht eine niedrige Ausgangsimpedanz gegenüber, aufgrund dessen eignet sich diese Schaltung zur Impedanzumwandlung.



U_B	Betriebsspannung
R_S	Arbeitspunkt-widerstand
U_E	Eingangsspannung
U_A	Ausgangsspannung
T	Feldeffekttransistor

Abb. 76
FET in Drainschaltung

¹¹⁵ Vgl. ebda.

Zusammenfassung

Ich hoffe, mit dieser Arbeit einen kurzen Überblick über das immer noch hochaktuelle Forschungsthema der Halbleiter gegeben zu haben. Aber es ist noch lange nicht alles Wissenswerte erwähnt, da dies den Rahmen der Arbeit sprengen würde.

Ich habe durch diese Arbeit Einsicht in die Elektronik und die Funktionsweise der verschiedenen Halbleiterbauelemente gewonnen und außerdem viel Wissenswertes über Technologien zur Herstellung und deren Problematik erfahren. Mir wurde bewußt, wie präzise und aufeinander abgestimmt die einzelnen Prozeßschritte sein müssen, um jede auch noch so geringe Art der Verunreinigung, welche die Eigenschaften des Halbleiter beeinträchtigen würde, zu vermeiden.

Der derzeit am meisten produzierte und erforschte Halbleiter Silizium wird z.B. als Werkstoff für fast alle kommerziellen mikro-mechanischen Bauteile benutzt. Die industrielle Entwicklung regt heute vielfach Entdeckungen der Halbleiterphysik an, um bestimmte Produkte vereinfacht und kostengünstiger zu fertigen. Moderne Informationsverarbeitung, Weltraumfahrt, Radioastronomie und Hoch-energiephysik, medizinische Technik, wie z.B. Computertomographie oder Herzschrittmacher, moderne Steuerung und Regelung elektrischer Leistung ganz allgemein, das alles ist ohne Halbleiterbauelemente nur wenige Jahrzehnte nach deren Erfindung überhaupt nicht mehr denkbar.

Die künftige Forschung wird sich mit der Lösung aktueller Probleme befassen. Dazu zählen z.B. die physikalischen Schwierigkeiten gegenwärtiger Technologien und die Tendenz zu extremer Miniaturisierung des Einzellements und die damit verbundenen Probleme der Reinheit, der Dotierung und der Fehlerfreiheit.

Weitere Themen der Forschung sind neue Analyseverfahren zur Auflösung im atomaren Bereich, wie z.B. das Rastertunnelmikroskop.

Die Übergänge zu Phasen mit metallischer Leitung nicht nur durch Dotierung, sondern durch die Wirkung elektrischer und magnetischer Feldstärke auch bei tiefen Temperaturen werden in ihrer Bedeutung wachsen. Besondere Bedeutung bekommt dies im Zustand mit supraleitenden Phasen, die für die Verdrahtung im Chip genutzt werden und die die Verlustleistung eines hochintegrierten Chip bei Tieftemperaturbetrieb drastisch senken könnten.

Ein weiterer Schritt in die Zukunft ist es, niederdimensionale Strukturen in Halbleitern, wie sie schon in MOS-Strukturen vorliegen, zu erfassen. In Österreich sind zur Zeit in Leoben unter Zusammenarbeit des theoretischen und experimentellen Physik Institutes Forschungsprojekte mit diesen Themen vorgeschlagen.

Literaturnachweis

1. Ardenne, Manfred van: Effekte der Physik und ihre Anwendung. Berlin 1990
2. Böhmer, Erwin: Elemente der Angewandten Elektronik. Kompendium für Ausbildung und Beruf. 4. Aufl. Braunschweig 1986
3. Der Transistor I. Grundlagen, Kennlinien, Schaltbeispiele. 3. Aufl. Franzis-Arbeitsbuch, München 1962
4. Freyhardt, Herbert, Hillebrecht, Franz Ullrich u.a.: Bergmann-Schaefer. Lehrbuch der Experimentalphysik. Band 6, Festkörper. Berlin, New York 1992
5. Heywang, Fritz, Nücke, Erwin, Timm, Jochen: Physik für Techniker. 18. Aufl. Hamburg 1986
6. Heywang, Walter, Müller, Rudolf: Halbleiter-Elektronik. Sensorik. Band 17, 4. Aufl., Berlin u.a. 1993
7. Kittel, Charles: Einführung in die Festkörperphysik. 8. Aufl. München 1989
8. Möschwitzer, Albrecht: Grundlagen der Halbleiter und Mikroelektronik. Integrierte Schaltungen. Band 2, München u.a. 1992
9. Müller, Rudolf: Halbleiter-Elektronik. Grundlagen der Halbleiter - Elektronik. 5. Aufl., Berlin, Heidelberg u.a. 1987
10. Richter, Heinz: Transistor Praxis. Praxis der Elektronik. 3. Teil, 2. Aufl., Stuttgart 1957
11. Safarik, Josef, Vojta, Josef, Radkorsky, Ottokar: Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik. 5. Aufl. Wien 1972
12. Schreiber Josef: Physik 3 für die Oberstufe der allgemeinbildenden höheren Schulen. Wien 1991
13. Stoiber, Helmut: Grundlagen der elektrischen Schaltungstechnik. Eine umfassende Darstellung der Schaltungsentwicklung mit modernen Halbleiterbauelementen. Franzis-Arbeitsbuch, München 1992

14. Transistorkompodium. Teil I, Grundlagen. Valvo, Hamburg 1967
15. Vorndran, Edgar P.: Entwicklungsgeschichte des Computers. 2. Aufl., Berlin, Offenbach 1986
16. Weichert Lothar u.a.: Temperaturmessung in der Technik. Grundlagen und Praxis. Band 9, 3. Aufl., Grafenau, Berlin 1981
17. Weißmantel Christian, Hamann Claus: Grundlagen der Festkörperphysik. Berlin u. a. 1979
18. Fedotov, Jankov A., Pohl, Hans J.: Fotolithographie. Grundlagen und Anwendung von Halbleitertechnologie. Berlin 1974
19. Madelung, Otfried: Semiconductors. Berlin, Heidelberg 1991
20. Seeger, Karlheinz: Halbleiterphysik. Braunschweig, Wiesbaden 1992
21. Univ. Doz. Dr. Jäger, Helmut: Vorlesung Experimentalphysik V. Wintersemester 1994
22. Univ. Doz. Dr. Ninaus, W.: Vorsleung Elektronik I und II. Winter- und Sommersemester 1994

Arbeitsprotokoll zur Fachbereichsarbeit aus Physik
“Halbleiter - ein Stoff revolutioniert die Erde
Nichts funktioniert ohne Halbleiter, aber wie funktioniert er“

Claudia Ringer, Schülerin der 8.e Klasse
BORG Hasnerplatz 12, 8010 Graz

Betreuender Lehrer: Mag. Heimo Hergan

1. Juli 1994: Treffen mit Professor Hergan: Grobbesprechung des Themas mit Inhaltsvorstellungen

September 1994: Auswählen der benötigten Literatur

22. September 1994: Fixierung des Titels und Einreichung beim Landesschulrat

19. Oktober 1994: Treffen mit Prof. Hergan: Besprechung der Literatur

Oktober bis Dezember 1994: Erarbeiten des benötigten Wissen aus der Literatur und Verfassen eines Konzeptes der Arbeit

16. November 1994: Treffen mit Prof. Hergan zur Inhaltsbesprechung des 1. Kapitels: Geschichte

30. November 1994: Treffen mit Prof. Hergan zur Inhaltsbesprechung des 2. Kapitels: Was ist ein Halbleiter

21. Dezember 1994: Treffen mit Prof. Hergan zur Inhaltsbesprechung des 3. Kapitels: Halbleitermaterialien und des 4. Kapitels: Herstellung von Halbleiterwerkstoffe

17. Jänner 1995: Treffen mit Prof. Hergan zur Inhaltsbesprechung des 5. Kapitels: Herstellung von IC´s und verschiedene Technologien

24. Jänner 1995: Treffen mit Prof. Hergan zur Inhaltsbesprechung des 6. Kapitels: Abhängigkeiten und des 7. Kapitels: Prinzipielle Funktion von Halbleiterbauelementen

November 1994 - Jänner 1995: Schriftliches Verfassen der Arbeit

Februar 1995 Fertigstellen der Arbeit am Computer

Letzte Februarwoche: Abgabe der Arbeit

Erklärung

Hiermit bestätige ich, **Ringer Claudia**, Schülerin der 8.e Klasse, daß ich die Fachbereichsarbeit "Halbleiter - ein Stoff revolutioniert die Erde" eigenständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel verfaßt habe.

Graz, am __.__.1995

Claudia Ringer