

I. Halbleiter und Bauelemente

I.1 Halbleiter Materialien

Halbleiter-Bauelemente dominieren heute in der Elektronik und haben z.B. die Röhre fast völlig verdrängt. Nur höchste Leistungen und Frequenzen sowie Bildröhren werden heute noch durch Röhren bedient. Trotzdem zeichnen sich Entwicklungen ab, wie IC's nach dem Röhrenprinzip mit Feldemissions-Kathoden.

Halbleiter stehen elektrisch zwischen den Isolatoren und Leitern. Chemisch reinen Halbleitern ist gemeinsam, daß sie bei tiefen Temperaturen isolieren und von einer bestimmten Temperatur an eine rasch anwachsende Leitfähigkeit zeigen. Diese intrinsische oder Eigenleitfähigkeit stört den Einsatz bei hohen Temperaturen.

Es gibt eine ganze Reihe halbleitender Materialien. Man unterscheidet zuerst Element- und Verbindungshalbleiter. Letztere werden weiter unterteilt nach den Hauptgruppen der beteiligten Elemente im Periodensy-

stem, z.B. III-V, II-VI und IV-IV Halbleiter. Zusätzlich kann man noch die Zahl der Verbindungspartner angeben: Binär (2), ternär (3) und quaternär (4). In ternären und quaternären Verbindungen müssen sich die Anzahlen der Atome aus den verschiedenen Hauptgruppen natürlich entsprechen. So hat Galliumarsenidphosphid GaAsP die variable Zusammensetzung $\text{GaAs}(x)\text{P}(1-x)$, wobei x zwischen 0 und 1 liegt. Entsprechend lautet die Formel beim Galliumindiumarsenidphosphid: $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ mit x und y jeweils zwischen 0 und 1.

Tabelle 1 zeigt die für Halbleiter wichtigen Elemente des Periodensystems. Die II. Hauptgruppe umfaßt die Erdalkalimetalle Beryllium - Barium. Für Halbleiter ist nur die II. Nebengruppe interessant, von der das jeweils wichtige Element aufgeführt ist.

II. Nebengr.	III. Hauptgr.	IV. Hauptgr.	V. Hauptgr.	VI. Hauptgr.
	B Bor	C Kohlenstoff	N Stickstoff	O Sauerstoff
	Al Aluminium	Si Silizium	P Phosphor	S Schwefel
Zn Zink	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsen	Se Selen
Cd Cadmium	In Indium	Sn Zinn	Sb Antimon	Te Tellur
Hg Quecksilber	Tl Thallium	Pb Blei	Bi Wismut	Po Polonium

Tab. 1: Auszug des Periodensystems der Elemente

I.2 Dotierung

Von elementarer Bedeutung für alle Halbleiter-Bauelemente ist die Möglichkeit, die Leitfähigkeit durch Beimischen winziger Mengen anderer Elemente zu beeinflussen. Diese "Dotierung" erzeugt je nach Dotierelement im Halbleiter positive oder negative freibewegliche Ladungsträger. Positive Ladungsträger sind Elektronenlöcher (Defektelektronen) und führen zu p-leitendem Halbleiter. Negative Ladungsträger sind Elektronen, die n-Leitung verursachen. P-dotierend wirken Elemente aus einer niedrigeren Hauptgruppe des Periodensystems, n-dotierend sind dagegen Elemente aus einer höheren Hauptgruppe.

So wird Silizium (IV. HG) durch Gallium (III. HG) p-dotiert und durch Arsen (V. HG) n-dotiert. Ein bereits dotierter Halbleiter kann in den anderen Leitfähigkeitstyp umdotiert werden. Der wirkungsmäßig überwiegende Dotierstoff entscheidet, ob p- oder n-Leitfähigkeit herrscht. Wichtig ist auch, daß in einem dotierten Halbleiter neben den Ladungsträgern des Leitfähigkeitstyps (Majoritätsträger) immer auch eine geringe Konzentration von Ladungsträgern des jeweils anderen Leitungstyps vorhanden ist (Minoritätsträger). Das Produkt der beiden ist eine Materialkonstante.

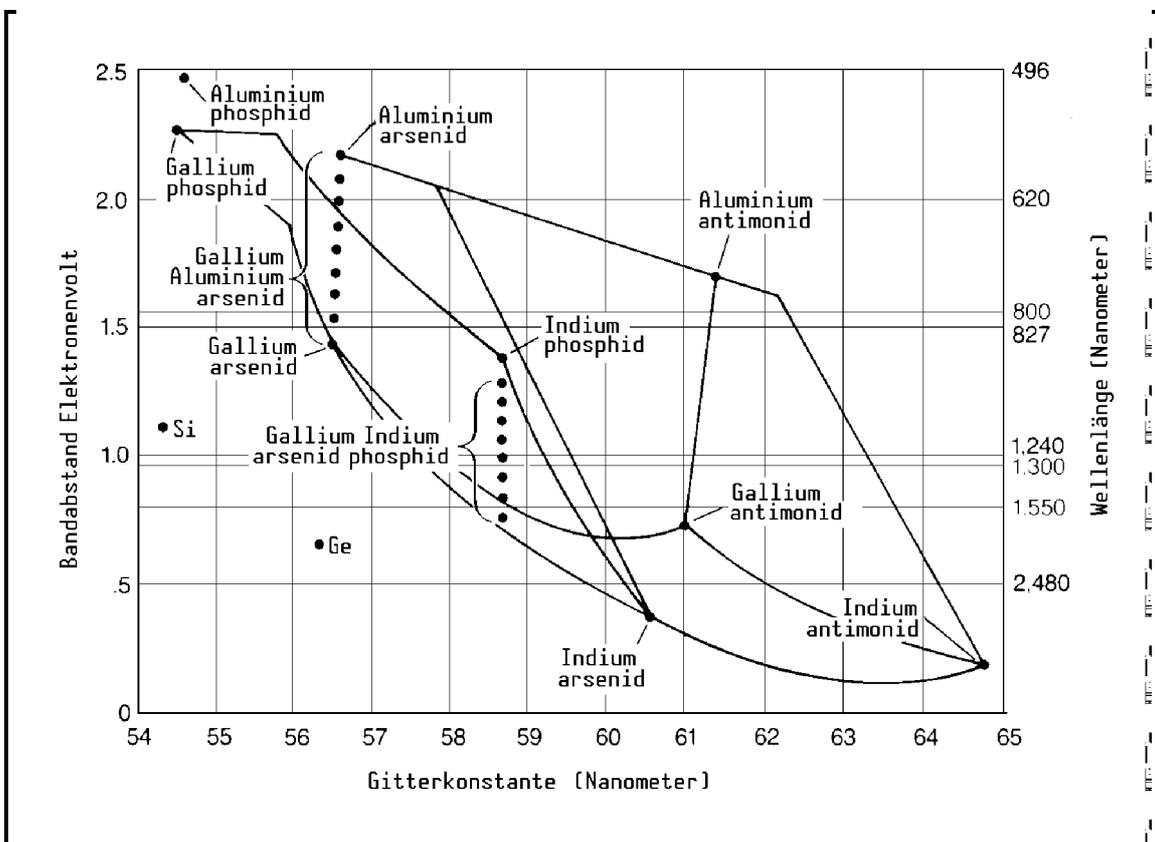


Abb. 1-1: Gitterkonstante und Bandabstand

Beispiele für verwendete Halbleiter und typische Anwendungen sind:

Element-Halbleiter:

Si, Ge: Die "klassischen" Halbleiter

Se: Fotoelemente

C: (Diamant) in Entwicklung

Einige Verbindungs-Halbleiter:

III-V Verbindungen:

GaAs: Feldeffekt Transistoren, schnelle IC's, Optoelektronik

InSb, InAs: Feldplatten und Hallgeneratoren

GaAsP, GaAlAs, GaInAsP: LED's, Laserdioden, Infrarot Detektoren

II-VI Verbindungen:

ZnS: Leuchtstoffe, Farbe je nach Dotierung

CdS: CdSe: Fotowiderstände

HgCdTe: Infrarot-Detektoren

IV-IV Verbindungen:

SiC: Leistungsbaulemente, blaue Leuchtdioden

SiGe: Höchsthfrequenz-Baulemente

I.3 Eigenschaften von Halbleitern

Die Vielzahl der verwendeten Halbleiter Materialien zeigt schon, daß für bestimmte Bauelemente Halbleiter mit passenden Eigenschaften benötigt werden. So kann man aus Silizium keine Leuchtdioden herstellen und aus GaAs keine bipolaren Transistoren (siehe I.3). Die wichtigsten Eigenschaften eines Halbleiters sind:

Der Bandabstand:

Der Bandabstand entspricht der erforderlichen Energie zur Erzeugung eines Elektron-Loch Paares. Er beeinflusst die Flußspannung einer Diode und die Farbe des Lichts einer

Leuchtdiode. Je größer er ist, desto höher ist die mögliche Betriebstemperatur.

Die Gitterkonstante:

Das ist der Abstand zwischen gleichen Atomanordnungen im Halbleiterkristall. Sie muß bei Schichtenfolgen ungleicher Halbleiter möglichst genau übereinstimmen. Moderne optoelektronische Bauelemente werden aus Schichtenfolgen von Halbleitern verschiedenen Bandabstands aber gleicher Gitterkonstante aufgebaut. Mangels passender Halbleiter in der Natur setzt man ternäre und quaternäre III-V Verbindungshalbleiter ein, die man durch Wahl der Zusammensetzung für ein Bauelement maßschneidern kann. Man sieht in Abb. I.1 Bandabstand und Gitterkonstante verschiedener Verbindungshalbleiter. Beim GaAlAs und dem GaInAsP ändert sich in Abhängigkeit von der Zusammensetzung wohl der Bandabstand, nicht aber die Gitterkonstante. Damit kann man Schichten dieser Verbindungen aufeinander aufwachsen lassen. Der Bereich dieser Verbindungen ist in Abb. 1-1 punktiert.

Die Ladungsträgerbeweglichkeit

Eine hohe Beweglichkeit der Ladungsträger ist für hochfrequente und galvanomagnetische (Feldplatten und Hallgeneratoren) Bauelemente wichtig. Der Strom wird dann (z.B. InSb, GaAs) von sehr wenigen, schnell bewegten Ladungsträgern getragen, bei geringer Beweglichkeit (z.B. Si) von sehr vielen, relativ langsam bewegten Ladungsträgern.

I.4 Halbleiter Bauelemente

Halbleiter Bauelemente lassen sich in bipolare und monopolare Bauelemente einteilen. In bipolaren Bauelementen fließt der Strom durch Gebiete beiderlei Dotierung, durchquert also auch pn-Übergänge, während bei den monopolaren MOS-Bauelementen der Strom nur in n- oder p-dotiertem Halbleiter fließt.

a) Dioden

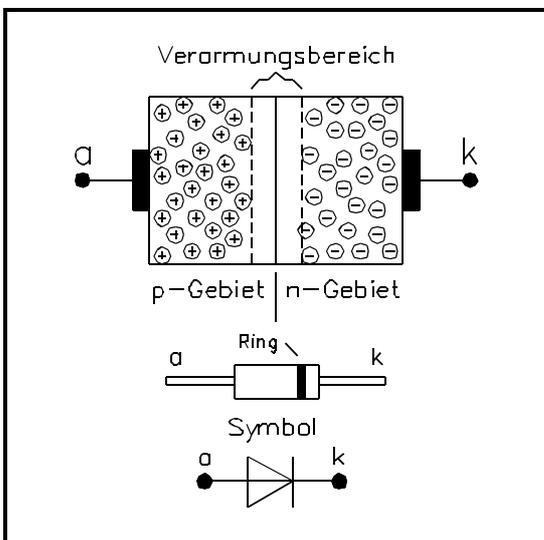


Abb. 1-2: pn-Übergang und Diode

Das einfachste bipolare Bauelement ist die Diode, deren Funktion auf einem pn-Übergang beruht. Am pn-Übergang grenzen p- und n-dotierter Halbleiter aneinander. Ist der n-Bereich (Kathode) positiv gegenüber dem p-Bereich (Anode), so werden in beiden Bereichen die Ladungsträger vom pn-Übergang weggezogen (verschiedene Vorzeichen) und es entsteht um den pn-Übergang herum ein Gebiet ohne Ladungsträger, der Verarmungsbereich. Mangels Ladungsträgern ist dieser hochohmig und es fließt kein Strom - die Diode sperrt.

Bei umgekehrter Polung der Diode werden von beiden Bereichen her die Ladungsträger zum pn-Übergang und weiter ins Gebiet des anderen Leitfähigkeitstyps gezogen. Dort rekombinieren Elektronen und Elektronenlöcher beim Aufeinandertreffen. Bildlich gesprochen "fällt" ein Elektron in ein Loch und setzt dabei etwas Energie in Form von Wärme frei. In dieser Polung fließt ein Strom durch die Diode, der mit wachsender Spannung sehr stark zunimmt - die Diode leitet. Der Spannungsabfall bei einem fließenden Strom wird als Flußspannung bezeichnet. Sie beträgt bei Siliziumdioden etwa 0,65 V und ändert sich nicht allzu stark bei Zunahme des Stroms.

Ein anderer (nicht bipolarer) Diodontyp nutzt einen Metall-Halbleiter Übergang, z.B. Aluminium gegen n-Silizium. Die nach dem Entdecker dieses Effekts benannten Schottky-Dioden sind extrem schnell und haben eine kleinere Flußspannung als pn-Dioden. Nachteilig sind die höheren, mit wachsender Temperatur stark zunehmenden Sperrströme.

b) bipolare Transistoren

Ein gewöhnlicher (=bipolarer) Transistor besteht aus drei Halbleiterschichten mit abwechselnder Leitfähigkeit. Die Transistoren werden nach den zwei möglichen Schichtenfolgen npn und pnp bezeichnet. Alle Ströme und Spannungen beim pnp-Transistor haben das umgekehrte Vorzeichen wie beim npn-Transistor. Alle Eigenschaften des npn-Transistors gelten mit diesem Unterschied auch für den pnp-Transistor.

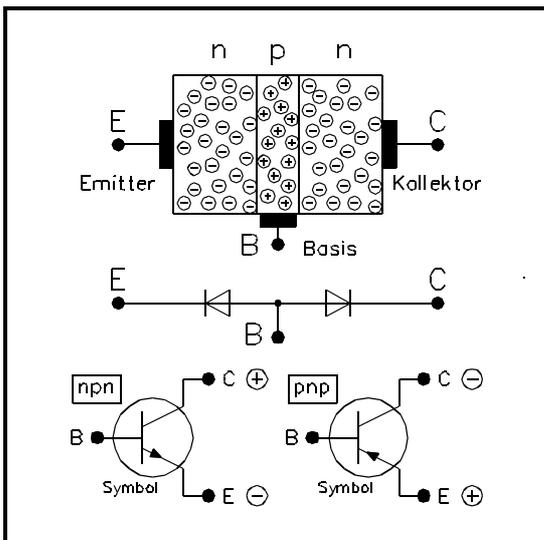


Abb. 1-3: pn-Übergang und Diode

Die 3 Schichten des Transistors sind in Reihenfolge der n-leitende Emitter E, die p-leitende Basis B und der n-leitende Kollektor C. Elektrisch besteht der Transistor aus 2 pn-Übergängen mit gemeinsamer Anode an der Basis des Transistors. Diese Anordnung erlaubt eine rasche Feststellung der Polarität und der Funktionsfähigkeit eines Transistors. Beim npn-Transistor leitet bei positiver Basis die BE- und die BC-Diode und ist niederohmig. Bei umgekehrtem Vorzeichen (negative Basis) sperren beide Dioden und sind hochohmig. Die CE-Strecke muß immer hochohmig sein, da ja stets eine der beiden Dioden sperrt.

Zum Verstehen der Funktion des Transistors nehmen wir an, daß der Emitter mit dem Minuspol und der Kollektor mit dem Pluspol einer Spannungsquelle verbunden ist. Wir wissen bereits, daß bei offenem Basisanschluß kein Strom fließt, weil die CB-Diode sperrt. Das ändert sich, wenn wir einen kleinen Strom in die Basis hineinfließen lassen, z.B. über einen Widerstand.

Der Basisstrom fließt zum Emitter ab, dabei wandern aus der Basis Löcher in die Emitterschicht und aus dem Emitter Elektronen in die Basisschicht. Das allein wäre in keiner Weise bemerkenswert, da die CB-Diode weiterhin sperrt. Entscheidend für den Transistoreffekt ist die sehr dünne Basisschicht. Dank der geringen Dicke der Basiszone haben die Elektronen gute Aussichten, diese zu durchlaufen, bevor sie mit einem Loch in der Basisschicht rekombinieren. Hat ein Elektron erst einmal den Verarmungsbereich der CB-Diode erreicht, so wird es mit Vehemenz zum positiven Kollektor gezogen. In einem durchschnittlichen Niederfrequenz-Transistor schaffen mehr als 99% der vom Emitter kommenden Elektronen den Weg durch die Basis zum Kollektor und weniger als 1% rekombinieren in der Basisschicht. Das bedeutet, daß der Kollektorstrom mehr als 99 mal so groß ist, wie der Basisstrom. Der Quotient I_C/I_B wird als Gleichstromverstärkung B bezeichnet: $B = I_C/I_B$. B hängt nur wenig von der Größe der Ströme ab.

Auf diese Weise steuert im Transistor der kleine Basisstrom den viel größeren Kollektorstrom. Schaltet man den Basisstrom wieder ab, so werden keine Elektronen mehr vom Emitter in die Basisschicht gezogen und der Kollektorstrom versiegt.

Trotz des geringen Basisstroms fließt durch die Basis-Emitter Diode der volle Kollektorstrom und U_{BE} ist gleich der Flußspannung einer vom Kollektorstrom durchflossenen Diode (ca. 0,65 V). Der Basisstrom führt dazu, daß ein bipolarer Transistor immer eine Steuerleistung P_S braucht:

$$P_S = I_B \cdot U_{BE}$$

c) MOSFETs vom Anreicherungstyp

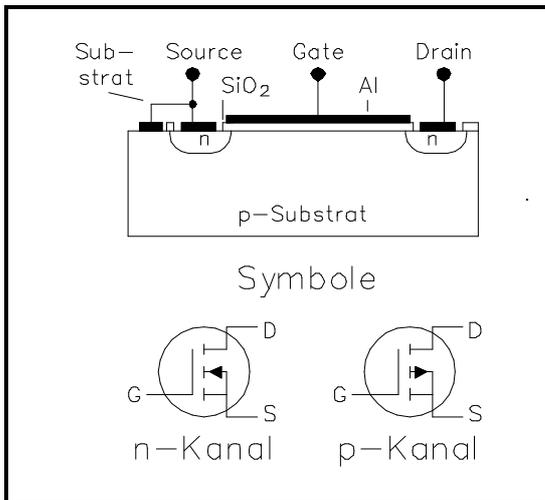


Abb. 1-4: MOSFET (Anreicherungstyp)

Der MOS-Feldeffekttransistor, kurz MOSFET (= Metall-Oxid-Semiconductor Field Effect Transistor) bewirkt die Steuerung des Stroms nach einem völlig anderen Prinzip. Das den Stromfluß steuernde Gate (=Tor) ist durch eine sehr dünne Schicht aus isolierendem SiO₂ (Siliziumdioxid, kurz: Oxid) von den anderen Anschlüssen elektrisch vollkommen isoliert. Im schwach p-leitenden Substrat befinden sich zwei n-leitende Inseln, welche Source (=Quelle) und Drain (=Abfluß) genannt werden.

Im Bauelement ist Source mit dem Substrat verbunden und liegt am Minuspol, während Drain über den Arbeitswiderstand mit dem Pluspol einer Spannungsquelle verbunden ist. Der pn-Übergang Drain-Substrat ist in Sperrichtung vorgespannt und ohne Gatespannung fließt kein Drainstrom. Das ändert sich, sobald an das Gate eine positive Spannung gelegt wird.

Wegen der extrem geringen Dicke (nur einige μm) der Oxidschicht tritt schon bei kleinen Spannungen eine sehr hohe elektrische Feldstärke an der Oberfläche des Substrats auf. Das Feld ist so stark, daß die im p-leitenden Substrat in geringer Zahl vorhandenen Elektronen an die Oberfläche gezogen werden und sich unter dem Oxid anhäufen. Bei ausreichender Gatespannung überschreitet die Konzentration der Elektronen die Konzentration der Löcher und an der Oberfläche des Substratmaterials unter dem Oxid entsteht ein dünner n-leitender Kanal. Dieser stellt eine sperrschichtfreie Verbindung von der Source zum Drain dar und der Stromfluß setzt ein. Mit wachsender Gatespannung wird der Kanal immer dicker und niederohmiger und der Strom nimmt rasch zu.

So steuert die Gatespannung den Drainstrom, wobei das Gate strom- und daher leistungslos bleibt. Die leistungslose Steuerung im MOSFET hat ein prinzipielles Problem: Die extrem geringe Dicke des Gate-Oxids ergibt schon bei kleinen Spannungen die hohen Feldstärken. Bei höheren Spannungen (ca. 30V) bricht die Isolierschicht bereits durch. Schon geringfügige elektrostatische Aufladungen des völlig isolierten Gates können zur Durchschlag der Oxidschicht führen. Obwohl moderne MOS-Bauelemente Schutzdioden zur Ableitung von Überspannungen haben, ist Vorsicht bei der Handhabung und beim Einbau immer geboten.

d) MOSFETs vom Verarmungstyp

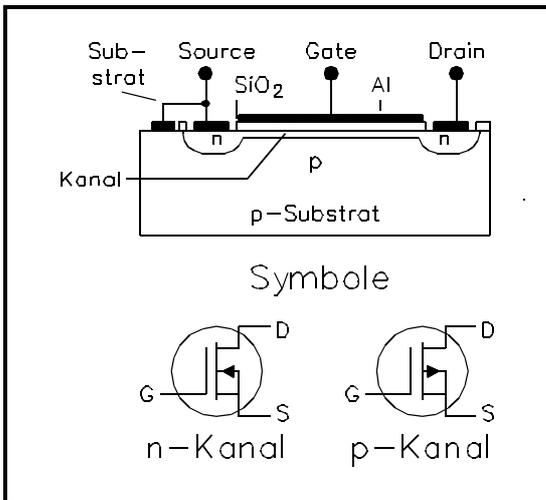


Abb. 1-5: MOSFETs (Verarmungstyp)

Im Verarmungs-MOSFET wird bei der Herstellung ein Kanal zwischen Source und Drain erzeugt. Legt man eine negative Spannung ans Gate, so bildet sich nach dem gleichen Prinzip wie beim Anreicherungstyp eine p-leitende Schicht direkt unter dem Gate-Oxid. Diese Schicht trägt aber nicht zum Stromfluß bei, sondern verengt vielmehr den Kanalquerschnitt und verringert dadurch den Drainstrom. Bei Gatespannung 0 fließt also Strom, der bei negativ werdender Gatespannung kleiner wird. Hieran kann man den Verarmungstyp vom Anreicherungstyp unterscheiden, der bei Gatespannung 0 sperrt. Bei beiden Typen erhöht aber eine positiver werdende Gatespannung den Drainstrom und umgekehrt.

e) Sperrschicht Feldeffekttransistoren
 Sperrschicht-Feldeffekttransistoren (JFET= Junction FET) haben ein Gate aus dotiertem Silizium, das vom Kanal durch eine Sperrschicht isoliert ist. Sie gehören auch zum Verarmungstyp. Bei Anlegen einer negativen Spannung ans Gate bildet sich eine Verarmungsschicht zwischen

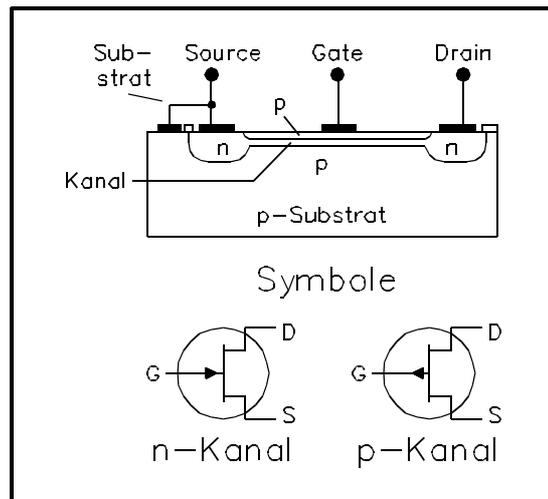


Abb. 1-6: JFETs

Gate und Kanal, die genau wie im Verarmungs MOSFET den Kanalquerschnitt einengt und den Stromfluß hemmt.

f) Leistungs MOSFETs

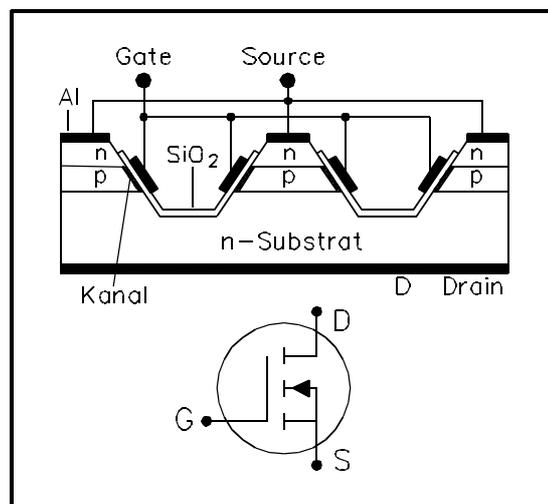


Abb. 1-7: Leistungs MOSFET

Für Leistungsanwendungen muß der Kanalwiderstand möglichst klein sein, um die ohmschen Verluste im eingeschalteten Zustand zu minimieren. Um einen möglichst großen Kanalquerschnitt auf einer möglichst kleinen Chipfläche unterzubringen benutzt man Anordnungen wie z. B. in Abb. 1-7. Auf dem n-Substrat befindet sich eine p- und darüber eine n-

leitende Siliziumschicht. Auf die Innenfläche der eingeätzten Gruben wird erst das Gateoxid und dann das Gatematerial aufgebracht. Positive Spannung am Gate erzeugt an der Oberfläche der p-Schicht den Kanal, durch den der Strom von der Source zum Drain fließt. Für höhere Sperrspannungen muß der Kanal länger und damit hochohmiger werden.

Leistungs MOSFETs schalten sehr schnell und sind damit für Schaltregler (siehe Kap. XI.3) hervorragend geeignet.

g) Insulated Gate Base Transistor

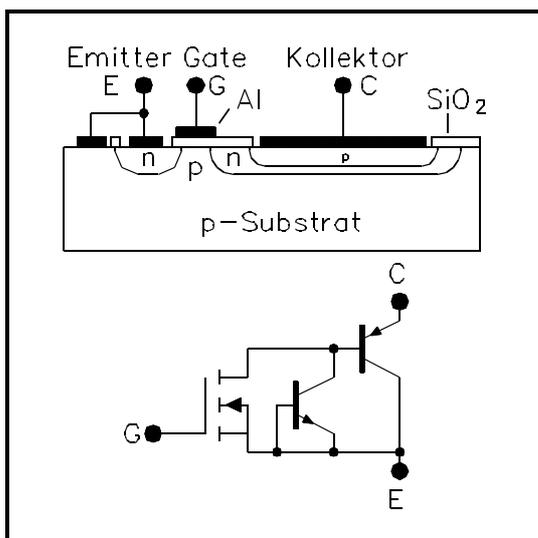


Abb. 1-8: Insulated Gate Base Transistor

Mit wachsender Sperrspannung brauchen MOSFETs einen immer längeren und dadurch hochohmigeren Kanal. Deswegen haben bei Sperrspannungen ab etwa 150 V bipolare Transistoren im eingeschalteten Zustand geringere Verluste als Leistungs MOSFETs. Den Nachteil des relativ großen Basisstroms vermeidet der Insulated Gate Base Transistor (IGBT) durch die Kombination eines n-Kanal MOSFETs mit einem pnp-Leistungstransistor.

Der MOSFET wird leistungslos gesteuert und schaltet den Basisstrom des pnp-Transistors. Der Spannungsabfall auch bei großen Strömen liegt um 1 Volt. Das Ersatzschaltbild in Abb. 1-8 zeigt auch den parasitären npn-Transistor aus Source, Substrat und Drain des MOSFET. Zusammen mit dem Emitter des pnp-Transistors entsteht so ein Thyristor (nnpn), dessen Zünden durch spezielle Maßnahmen ausgeschlossen werden muß.

h) Thyristoren

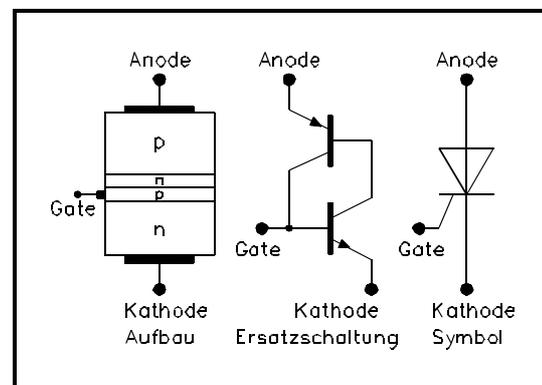


Abb. 1-9: Thyristor

Thyristoren sind in der Schichtfolge pnpn aufgebaut. Fast alle Eigenschaften werden durch die 2-Transistor Ersatzschaltung gut beschrieben. Bei negativer Anode sperrt der Thyristor immer. Bei positiver Anode sperrt der Thyristor, solange das Gate nicht angesteuert wird. Fließt ein kleiner Strom ins Gate, so verstärkt ihn der npn Transistor und schickt seinen Kollektorstrom in die Basis des pnp-Transistors. Dieser verstärkt den Strom weiter und führt ihn zum Gate zurück. Ist das Produkt der beiden Stromverstärkungen $B_{pnp} \cdot B_{nnpn} > 1$, so schaukelt sich der Strom sehr schnell auf, bis er z. B. durch die Last begrenzt wird. Man sagt: der Thyristor zündet. Im gezündeten Zustand überschweben die Ladungsträger die

beiden inneren Schichten und die Flußspannung ist sehr klein.

Der Thyristor bleibt gezündet, solange ein Mindeststrom - der Haltestrom - fließt. Gelöscht wird der Thyristor nicht über das Gate sondern durch Unterschreiten des Haltestroms für die Dauer der Freiwerdezeit. Dies ist die Zeit, welche die Ladungsträger brauchen, um durch Rekombination auszusterben.

Zum Leidwesen der Bauelementehersteller stellt jede Schichtfolge pnpn in einem Bauelement im Prinzip einen Thyristor dar. Dieser kann bei Zusammentreffen ungünstiger Umstände zünden, was für das Bauelement sehr negative Folgen haben kann. Man spricht dann von Latchup (Einschnappen), der in der Regel zur Zerstörung führt. Durch spezielle Maßnahmen senkt man das Produkt der beiden Stromverstärkungen unter 1 und beseitigt so diese Gefahr.

Spezielle GTO-Thyristoren (GTO = Gate Turn Off) können mit einem Stromimpuls in das Gate gelöscht werden. Dieser Strom muß aber durchaus 30 - 50% des fließenden Stroms betragen, keinesfalls genügen die zum Zünden erforderlichen Ströme im mA-Bereich.

Zum Einsatz des Thyristors siehe Abschnitt XI.1.

I.5 Herstellverfahren

Etwas lax ausgedrückt besteht die Kunst der Herstellung von Halbleiter-Bauelementen im gezielten Verschmutzen (=Dotieren) des Halbleiters. Die erste Dotierung des Halbleiters erfolgt bei der Herstellung des Basismaterials. Nach der extremen Reinigung wird vor dem Kristallziehen die erforderliche Menge Dotierstoff zugegeben, um die gewünschte Leitfähigkeit einzustellen. Die Produktion des Basismaterials ist eine Domäne von Spezialfirmen, welche die Hersteller von Bauelementen mit fertig gesägten Kristallscheiben der gewünschten Leitfähigkeit beliefern.

Die älteste Dotiermethode ist das Legieren. Man stellte früher Germanium Transistoren her, indem man auf beide Seiten eines dünn geschliffenen Plättchens aus n-Germanium je ein Kügelchen aus Indium setzte und in einem Ofen schmelzen ließ. Das Indium legierte sich in das Germanium hinein und erzeugte an der Grenze je eine p-leitende Schicht. Die Dicke der verbleibenden Basisschicht ließ sich über Ofentemperatur und Verweilzeit steuern. Durch die viele Handarbeit waren diese Transistoren bei recht mäßigen Eigenschaften noch ziemlich teuer. Trotzdem lösten sie eine Revolution in der Elektronik aus.

Für eine rationelle Massenproduktion von Transistoren und IC's eignet sich weit besser das Diffundieren. Man macht sich hier die Eigenschaft des Siliziums zunutze, sich in einer Sauerstoffatmosphäre bei hoher Temperatur mit einer Oxid- (=Quarz) Schicht zu überziehen. Diese Schicht ist sehr widerstandsfähig und verhindert den Zutritt von Dotierstoffen zum Silizium.

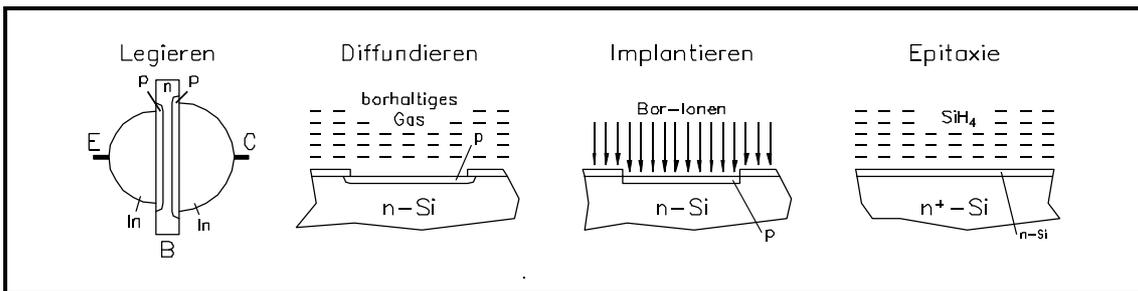


Abb. 1-10: Dotiermethoden

Vor dem Diffundieren muß man mit dem Prozeß der Photolithografie Öffnungen (=Fenster) in der Oxidschicht erzeugen. Dazu überzieht man die oxidierte Scheibe mit einem Photolack, der durch eine Maske belichtet und sodann entwickelt wird. Der Photolack hat jetzt Öffnungen, durch die hindurch man Öffnungen in die Oxidschicht ätzt und danach den Photolack wieder entfernt. Viele auf diese Weise vorbehandelte Scheiben kommen nun in einen Diffusionsofen, in dem bei hoher Temperatur ein dotierstoffhaltiges Gas über die Scheiben strömt. Der Dotierstoff Borwasserstoff BH_3 oder Phosphorwasserstoff PH_3 zersetzt sich an der Scheibenoberfläche und die Dotieratome diffundieren durch die Fenster in das Silizium hinein. Über Dotierstoffkonzentration und Temperatur kann man das Dotierungsprofil im Halbleiter steuern.

Das modernste Dotierverfahren ist die Ionenimplantation. Die Dotieratome werden ionisiert und mit einem kleinen Beschleuniger auf hohe Geschwindigkeit gebracht. Ähnlich einem Geschöß in einem Sandsack bleiben die Ionen in einer von der Geschwindigkeit abhängigen Tiefe im Halbleiter stecken. Über die Be-

schleunigungsspannung kann die Geschwindigkeit und damit die Eindringtiefe gesteuert werden, eine Messung des Ionenstroms ergibt mit höchster Präzision die Menge des Dotierstoffs. Beides sind ganz wesentliche Vorteile gegenüber der Diffusion. Die Eindringtiefe der Ionen ist mit der Beschleunigungsspannung einstellbar, aber doch relativ klein. Sie bleiben schon in der Oxidschicht stecken. Es können daher die üblichen photolithografischen Verfahren eingesetzt werden. Für moderne, hochtechnologische Bauelemente ist die Ionenimplantation unentbehrlich.

Bei der Herstellung von Transistoren schließt sich an die Dotierung der Basiszonen eine Oxidation der Oberfläche und ein zweiter, gleichartiger Schritt zur Dotierung der Emitter an. Als letztes wird nochmals oxidiert und Fenster geätzt, um eine Aluminiumschicht für die elektrische Kontaktierung aufzubringen. Eine Halbleiterscheibe mit 4 Zoll Durchmesser kann über 10000 Transistorsysteme enthalten, die nach Ritzen mit einem Diamanten oder mit Diamantsägen vereinzelt und in Gehäuse eingebaut werden.

Eine Komplikation liegt darin, daß für eine ausreichende Stabilität die Scheibe einige 100 μm dick sein muß, von denen der Transistor selbst nur etwa 20 μm in Anspruch nimmt. Der Widerstand dieser Siliziumschicht liegt in Reihe mit dem Kollektor des Transistors. Er stört besonders bei Transistoren mit höherer Sperrspannung, die hochohmiges Ausgangsmaterial erfordern.

Abhilfe bringt die Epitaxietechnik. Man geht von einer extrem hoch dotierten, äußerst niederohmigen Einkristallscheibe (Substrat) aus und läßt durch Darüberleiten von Silan (SiH_4) und Dotiergas bei hoher Temperatur eine dünne Kristallschicht passender Leitfähigkeit aufwachsen. Diese Epitaxieschicht ist gerade dick genug für den Transistor. Die sehr gut leitende, hochdotierte Substratscheibe versteift sie mechanisch ohne einen überflüssigen Widerstand zu verursachen. Eine geringfügig schlechtere Kristallqualität der Epitaxieschicht muß in Kauf genommen werden.

I.6 IC-Herstellung

Aus mehreren Gründen ist Silizium für die Herstellung von integrierten Schaltkreisen prädestiniert:

- Silizium bildet bei hoher Temperatur und Zutritt von Sauerstoff ein festhaftendes Oxid mit sehr guter mechanischer und chemischer Beständigkeit
- Silizium läßt sich einfach reinigen und dotieren
- Aus Silizium sind fast fehlerfreie Kristalle großen Durchmessers herstellbar

Das Galliumarsenid, ein Halbleiter mit hervorragenden elektrischen Eigenschaften hat kein Oxid wie das Silizium und die Kristalle weisen eine weitaus höhere Fehlerdichte auf. In hochintegrierten IC's genügt ein Kristallfehler zum Ausfall des betroffenen Chips. Deswegen bleibt der Integrationsgrad von Schaltungen aus GaAs weit hinter dem Silizium zurück.

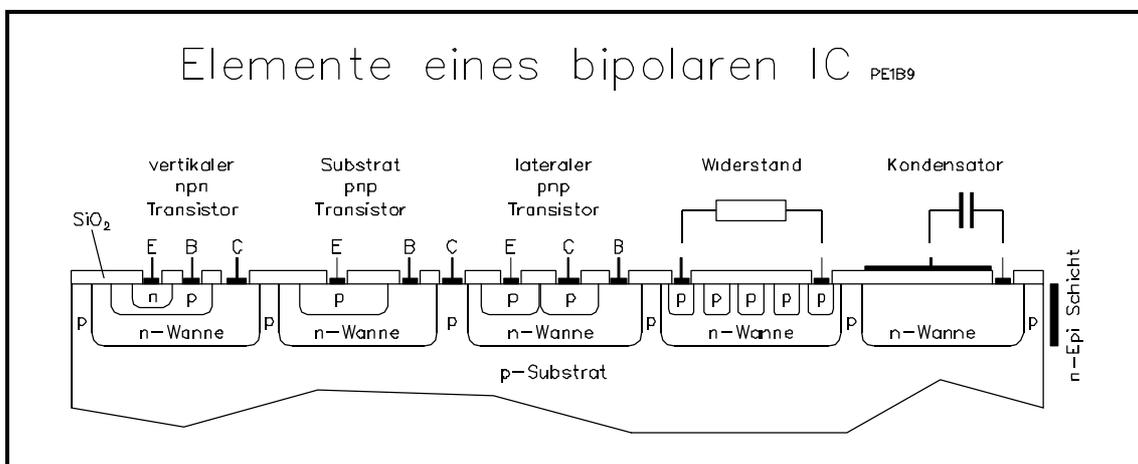


Abb. 1-11: Bauelemente eines bipolaren ICs

In IC's müssen die Kollektoren der einzelnen Transistoren elektrisch voneinander isoliert sein. Diese Isolation erreicht man durch Aufbringen einer n-leitenden Epitaxieschicht auf eine p-leitende Substratscheibe. In der n-leitenden Epitaxieschicht erzeugt man voneinander isolierte "Wannen", indem man entlang ihrer Grenzen p-leitende Streifen bis zum p-Substrat eindiffundiert, siehe Abb. 1-11. Wenn das Substrat mit der negativen Versorgungsspannung verbunden ist, isolieren die in Sperrichtung gepolten pn-Übergänge die Wannen voneinander.

In diesen Wannen entstehen mittels zweier Diffusionen in gewohnter Weise npn-Transistoren. Ein Problem stellen pnp-Transistoren dar. Zusammen mit den npn-Transistoren kann man ohne weiteres pnp-Transistoren mit dem Substrat als Kollektor und der Epitaxieschicht als Basis herstellen. Der Kollektor dieser Transistoren ist aber zwangsweise mit der negativen Versorgungsspannung verbunden, so daß sie nur als Emitterfolger einsetzbar sind.

Braucht man pnp-Transistoren mit isoliertem Kollektor, so müssen in der als Basis wirkenden p-Wanne Kollektor und Emitter in der Schichtenfolge nicht übereinander (vertikaler Transistor) sondern nebeneinander liegen (lateraler Transistor).

Laterale pnp-Transistoren haben sehr kleine Stromverstärkungen (3...5) und Grenzfrequenzen um 100 kHz. Man gleicht ihre schlechten Eigenschaften durch eine entsprechende Auslegung der Schaltung aus. Der Aufwand für diese Maßnahmen ist weit geringer als ein weiterer Diffusionsschritt für vertikale pnp-Transistoren. Man nimmt diese Eigenart bei bipolaren IC's daher gewöhnlich in Kauf.

Widerstände liegen als schmale, p-dotierte Streifen mäanderförmig in den Wannen. Kondensatoren verwenden die Oxidschicht als Dielektrikum und sind auf relativ kleine Werte beschränkt. Die Verwendung der Sperrschichtkapazität eines pn-Übergangs ermöglicht größere, aber stark spannungsabhängige Kapazitätswerte.

Hochintegrierte digitale Schaltkreise werden zur Begrenzung der Verlustleistung heute überwiegend in CMOS-Technik aufgebaut. In ein p-Substrat werden Source und Drain der n-Kanal Transistoren eindiffundiert oder implantiert. Für die p-Kanal Transistoren sind n-leitende Wannen erforderlich, in denen Source und Drain entstehen. Das erfordert eine zweimalige Diffusion oder Implantation. Dies erklärt den höheren Preis von CMOS-Schaltkreisen.

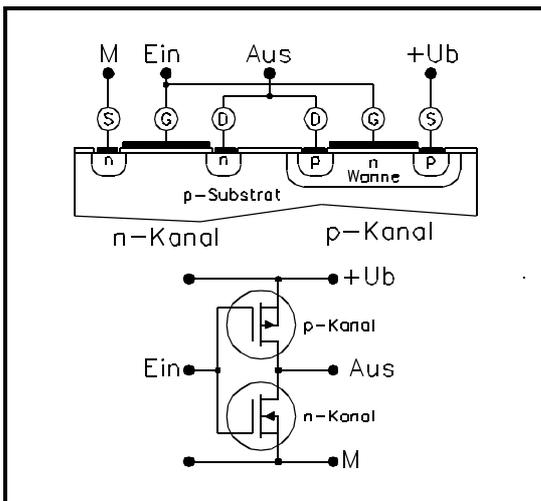


Abb. 1-12: CMOS Inverter

Grundelement der CMOS-Technik ist der CMOS-Inverter. Er besteht aus je einem n- und p-Kanal Transistor mit verbundenen Gates zwischen U_b und Masse. Liegt der Eingang an Masse oder U_b , so ist immer ein Transistor gesperrt, während der andere voll durchschaltet. Da immer einer der beiden Transistoren sperrt, fließt kein Ruhestrom. Nur während des Umschaltens leiten kurzzeitig beide Transistoren, was als cross-conduction bezeichnet wird. Bei den steilen Flanken in digitalen Schaltungen ist der kurzzeitige Stromfluß vernachlässigbar. Liegt der Eingang dauernd auf halber Versorgungsspannung, so kann bei höherer Versorgungsspannung der Querstrom den Inverter thermisch überlasten.

Bei 5V Versorgungsspannung ist der Querstrom noch zulässig, so daß man Inverter als billige analoge Verstärker mit einem Verstärkungsfaktor von ca. 7 und extrem hohem Eingangswiderstand einsetzen kann. Man findet diese in Frequenzzählern, Infrarot-Bewegungsmeldern und anderen Geräten mit geringen Anforderungen an die Genauigkeit. Als Beispiel siehe auch den Gatteroszillator in Kap. VIII.2, Abb. 8-4.

Im CMOS-Gatter tritt die Schichtenfolge pnpn als möglicher Thyristor auf. Dieser liegt zwischen der Versorgungsspannung und Masse. Zündet dieser Thyristor (Latch-up), so fließt ein sehr hoher Strom aus der Versorgungsspannung, der den IC zerstört. Durch besondere Techniken versuchen die Hersteller, die Latch-up Empfindlichkeit zu verringern. Vollkommen ausschließen kann man ihn nur durch Einsatz der sehr kostspieligen dielektrischen Isolation, also ohne sperrende pn-Übergänge.