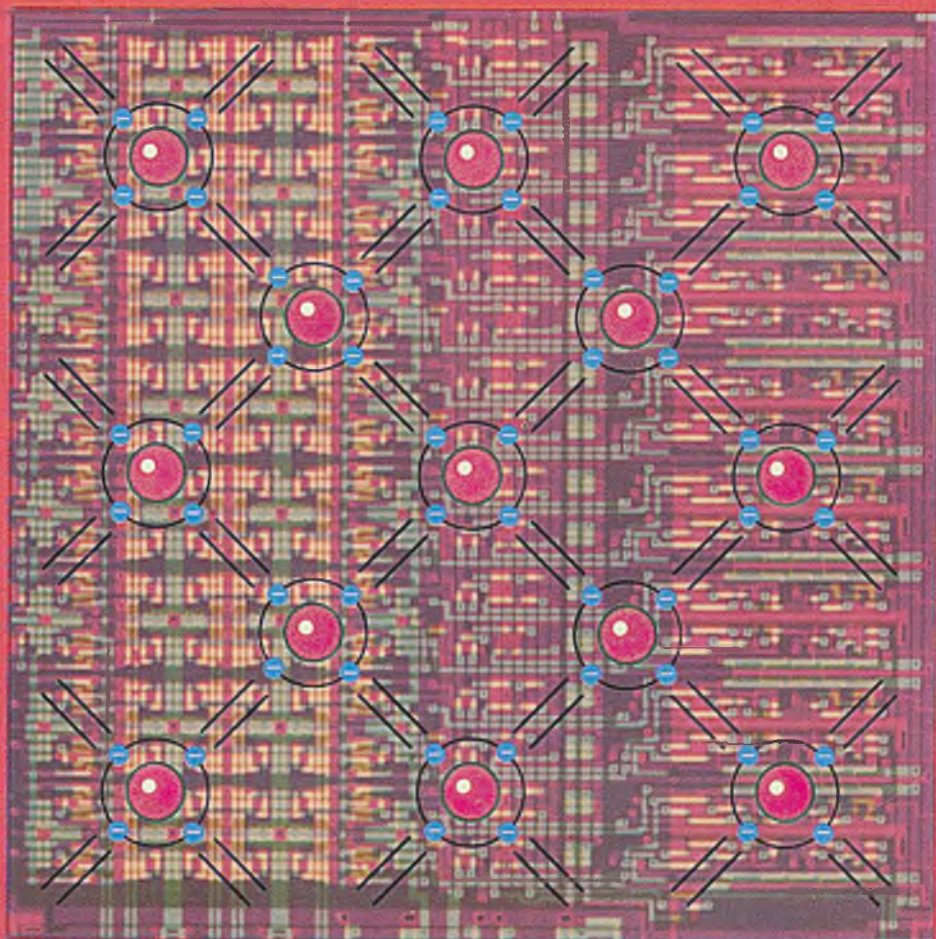


SIEMENS

Halbleiterbauelemente für die Elektronik



SIEMENS

Halbleiterbauelemente für die Elektronik

Ein Kompendium von

G. Bohle

E. Hofmeister

SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT

Herausgegeben vom
Bereich Bauelemente, Vertrieb,
8000 München 80, Balanstraße 73

Halbleiter

sind die Gestalter eines neuen technischen Zeitalters.

Wir verdanken der Halbleiter-Elektronik eine Fülle von neuartigen Produkten mit erstaunlichen Eigenschaften und einer schnell zunehmenden Verbreitung.

Die Entwicklung der modernen Halbleiter-Bauelemente setzte tiefgehende wissenschaftliche Erkenntnisse in der Physik der Festkörper voraus.

Die Halbleiterforschung begann vor etwa hundert Jahren mit der Entdeckung des Sperrschichteffektes. Den stärksten Impuls erhielt sie im Jahre 1948 durch die Entdeckung des Transistors.

Seit dieser Zeit ist eine für den Nicht-Halbleiter-Fachmann verwirrende Fülle neuer Begriffe und neuer Bauelemente entstanden. Das vorliegende Kompendium soll einen stichwortartigen Überblick vermitteln über die Technologien, den Aufbau, die Arbeitsweise, die elektrischen Eigenschaften und Anwendungen der wichtigsten jetzt verfügbaren Halbleiter-Bauelemente (Stand Januar 1976).

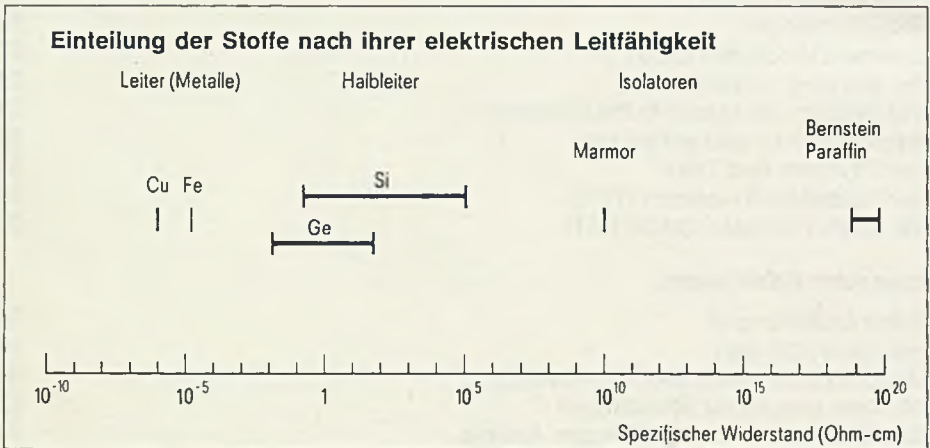
Inhaltsverzeichnis

Grundlagen	Seite
Physikalische und elektrische Eigenschaften von Halbleitern	6
Dotierte Halbleiter	8
Dotier-Techniken	10
pn-Übergang und Sperrschicht-Effekt	12
Einzelbauelemente	
Der Gleichrichter (Diode)	14
Dioden für spezielle Anwendungen	16
Mikrowellen-Dioden	18
Foto-Empfänger	20
Lumineszenzdioden (LED)	22
Der bipolare Transistor	24
Der Silizium-Transistor in Planartechnik	26
Silizium-Leistungstransistoren	28
Der Thyristor und Triac	30
Der Feldeffekt-Transistor (FET)	32
Der MOS-Transistor (MOS-FET)	34
Integrierte Schaltungen	
Schichtschaltungen	36
Hybridschaltungen	38
Monolithische Integrierte Schaltungen	40
Bipolare Integrierte Schaltungen	42
Bipolare Integrierte Schaltungen, analog	43
Bipolare Integrierte Schaltungen, digital	44
Großintegration	46
Bipolare Techniken für die Großintegration	48
MOS-Techniken für die Großintegration	50
p-MOS mit Aluminium-Gates	52
p-MOS mit Silizium-Gates	53
p-MOS mit Verarmungs- und Anreicherungs-Transistoren	54
n-MOS mit Aluminium-Gates	56
n-MOS mit Silizium-Gates	57
C-MOS (Komplementäre MOS-Technik)	58
ESFI-Technik	60
SOS (Silizium auf Saphir)	61
Ladungsgekoppelte Schaltungen (CCD)	62
Mikroprozessoren	64
Mikrocomputer	66
Stichwortverzeichnis	68

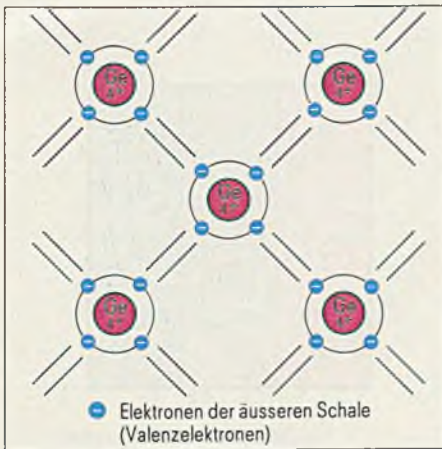
Physikalische und elektrische Eigenschaften von Halbleitern

Im Gegensatz zu Leitern und Isolatoren ist die Leitfähigkeit von Halbleitern stark abhängig von

- Temperatur
- Belichtung
- Dotierung mit Fremdstoffen



- Bei Raumtemperatur liegt die elektrische Leitfähigkeit der Halbleiter etwa in der Mitte zwischen der hohen Leitfähigkeit der Metalle und der verschwindend kleinen Leitfähigkeit der Isolatoren.

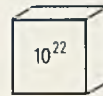


Aufbau eines Halbleiterkristalls
z. B. Germanium

Im ungestörten, reinen Halbleiterkristall sind bei tiefen Temperaturen keine freien Ladungsträger vorhanden. Die Elektronen der Atomhüllen stellen die Atombindung im Kristall her.

Durch Wärmezufuhr oder Lichteinstrahlung können sich Elektronen aus ihren Bindungen lösen. Es entstehen frei bewegliche Ladungsträger.

In 1 cm^3 eines Halbleiterkristalls befinden sich etwa



Atome

Dotierte Halbleiter

Germanium (Ge) und Silizium (Si) sind die wichtigsten elektronischen Halbleiter. Sie stehen in der IV. Gruppe des Periodischen Systems.

Die Atome besitzen 4 Elektronen in der äußersten Schale.

Ausschnitt aus dem Periodischen System der Elemente:

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

Neben Germanium und Silizium werden auch Verbindungen von Elementen der Gruppen III und V als Halbleitermaterialien verwendet, wie z. B. GaAs und InSb.

n-Dotierung

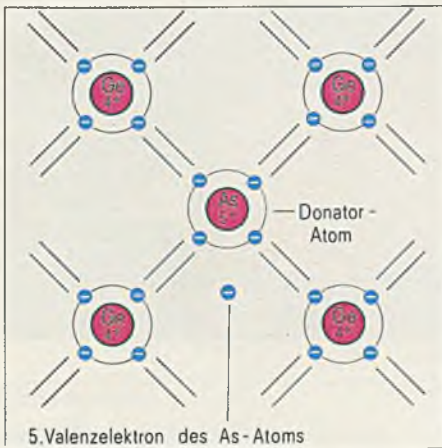
Einbau von Atomen aus der V. Gruppe (= 5 Außenelektronen) liefert freie Elektronen. Der Halbleiter wird n-leitend (negative Ladungsträger).

Atome, die Elektronen abgeben, nennt man **Donatoren**. Das Donatoratom selbst wird durch die Elektronenabgabe positiv geladen.

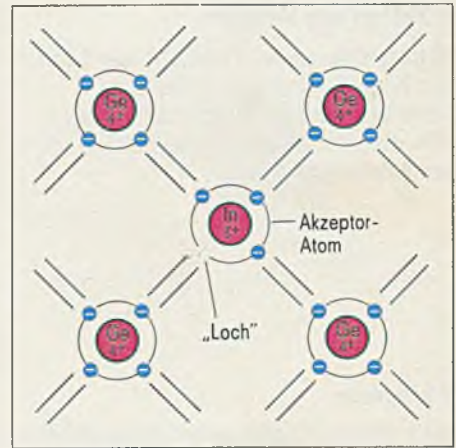
p-Dotierung

Atome aus der III. Gruppe (= 3 Außenelektronen) erzeugen Elektronenlücken („Löcher“). Springen Elektronen von benachbarten Atomen in die Elektronenlücken, wandern die Löcher wie positive Ladungsträger durch den Kristall. Der Halbleiter wird **p-leitend**. Atome, die Elektronen aufnehmen (= Löcher erzeugen), nennt man **Akzeptoren**. Das Akzeptoratom wird durch die Elektronenaufnahme negativ geladen.

Einbau eines Donator-Atoms (As)



Einbau eines Akzeptor-Atoms (In)



Beispiel

Normale Dotierung:
spez. Wid. $\sim 5 \Omega \text{ cm}$,
auf 10^7 Si-Atome 1 Donator-Atom



Starke Dotierung:
spez. Wid. $\sim 0,03 \Omega \text{ cm}$,
auf 10^4 Si-Atome 1 Donator-Atom



Beispiel

Normale Dotierung:
spez. Wid. $\sim 2 \Omega \text{ cm}$,
auf 10^6 Si-Atome 1 Akzeptor-Atom



Starke Dotierung:
spez. Wid. $\sim 0,05 \Omega \text{ cm}$,
auf 10^4 Si-Atome 1 Akzeptor-Atom



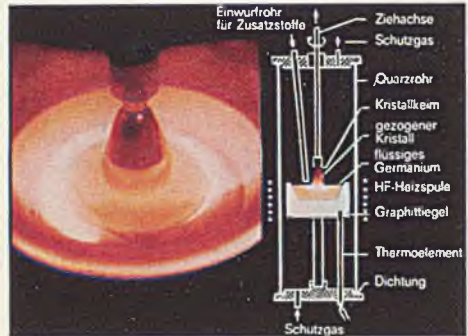
Dotier-Techniken

Dotieren ist möglich:

- beim Ziehen des Kristalls
- durch Legieren
- durch Diffundieren
- durch Implantieren

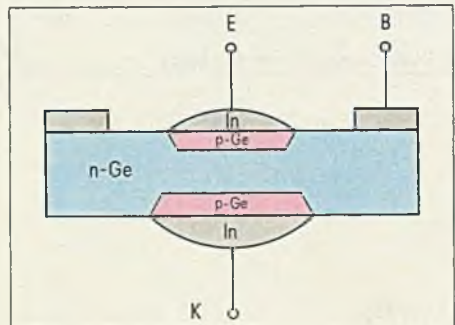
● Ziehen des Kristalls

Dotierstoffe (z. B. Antimon) werden der Kristallschmelze zugesetzt. Beim Ziehen des Einkristalls bauen sich die Atome des Dotierstoffes in das Kristallgitter ein.



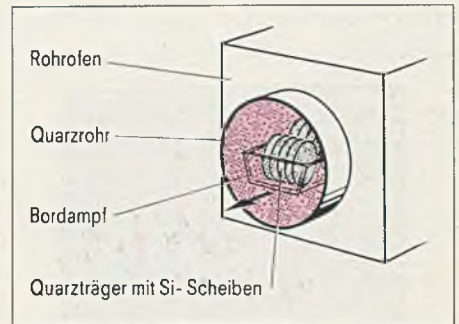
● Legieren

Beim Germanium-Legierungstransistor werden Indiumkügelchen auf den Ge-Kristall aufgeschmolzen. Ge und In verflüssigen. Beim Erstarren bauen sich Indium-Atome in das Ge-Gitter ein.



• Diffundieren

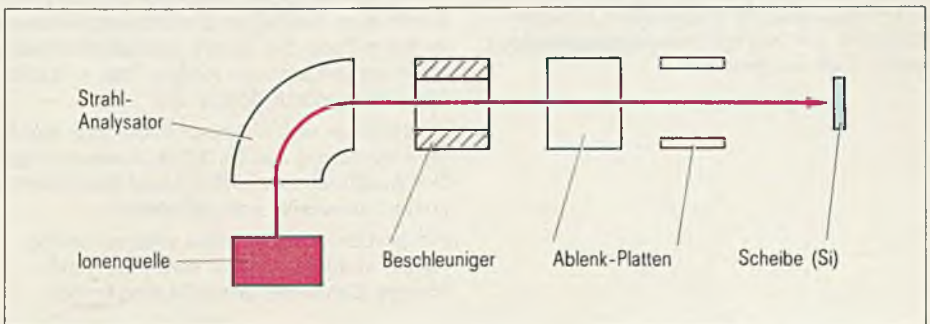
Si-Kristallscheiben werden bei 1000°C einem dampfförmigen Dotierstoff ausgesetzt, z. B. Bor. Boratome diffundieren in den n-Silizium-Kristall ein und erzeugen eine p-leitende Zone. n-leitende Zonen erhält man durch Diffusion mit Phosphor.



• Implantieren

Elektrisch geladene Atome (Ionen) eines gasförmigen Dotierstoffes werden in einem elektrischen Feld beschleunigt und in den Halbleiterkristall hineingeschossen.

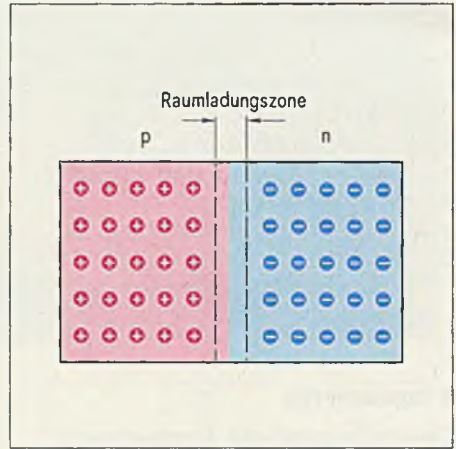
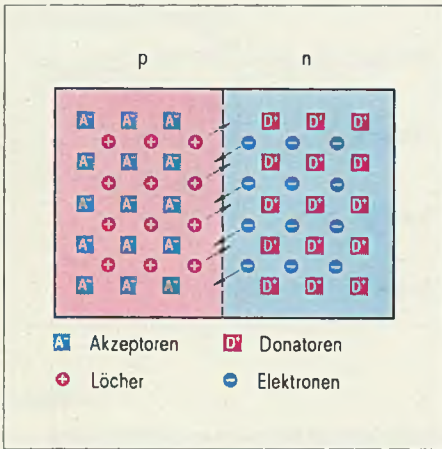
Ionenimplantation ermöglicht eine besonders genaue Konzentration und Lokalisierung der Dotierung.



pn-Übergang und Sperrschicht-Effekt

pn-Übergänge entstehen an den Grenzflächen von p-dotierten und n-dotierten Kristallzonen. Sie bilden eine Sperrschicht.

pn-Übergang ohne äußere Spannung



Grenzen eine p-leitende und eine n-leitende Kristallzone aneinander, so diffundieren Löcher aus dem p-Gebiet in das n-Gebiet und Elektronen aus dem n-Gebiet in das p-Gebiet. Die unterschiedlichen Konzentrationen der beweglichen Ladungsträger wollen sich ausgleichen.

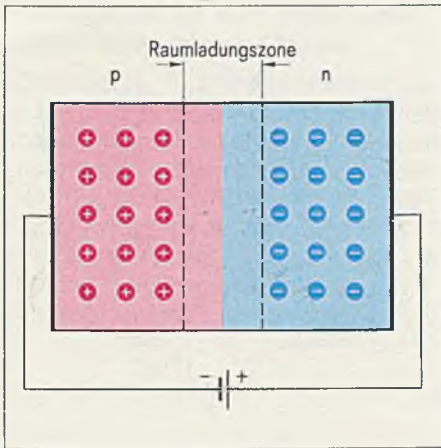
Durch den Verlust an Löchern bleiben in der p-Zone die negativ geladenen Akzeptoren unkomponiert zurück. Das p-Gebiet lädt sich dadurch negativ auf.

Durch den Verlust an Elektronen bleiben in der n-Zone die positiv geladenen Donatoren unkomponiert zurück. Das n-Gebiet lädt sich dadurch positiv auf.

Zwischen p- und n-Gebiet bildet sich somit eine Spannung aus (= Diffusionsspannung). Der Ausgleich von Löchern und Elektronen kommt hierdurch zum Stillstand.

Am pn-Übergang entsteht eine an beweglichen Ladungsträgern verarmte, hochohmige Zone, die „Raumladungszone“.

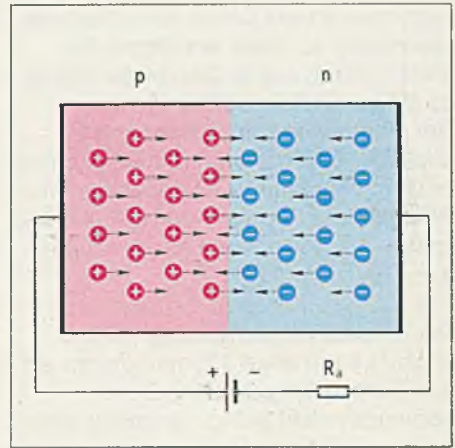
pn-Übergang mit äußerer Spannung



Negative Spannung am p-Gebiet und positive Spannung am n-Gebiet verbreitert die hochohmige Raumladungszone.

Der Strom ist gesperrt bis auf einen geringen Rest.

„Sperrichtung“



Positive Spannung am p-Gebiet und negative Spannung am n-Gebiet baut die Sperrschicht ab.

Ladungsträger überschwemmen den pn-Übergang. Der Strom kann fließen.

„Durchlaßrichtung“

Der Gleichrichter (Diode)

Dioden sind Bauelemente mit einem pn-Übergang.

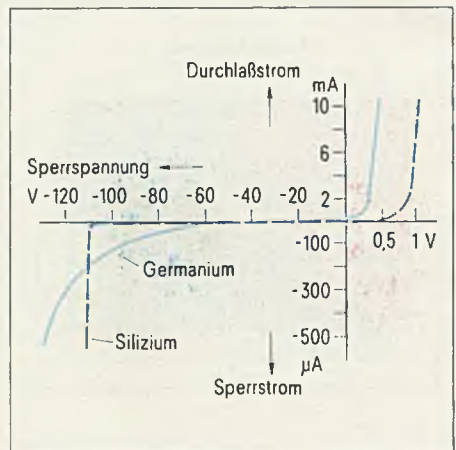
Elektrischer Widerstand der Diode

- hoch in Sperrichtung
- niedrig in Durchlaßrichtung

Legt man an die Diode eine Wechselspannung, so fließt ein Strom im wesentlichen nur in Durchlaßrichtung. Es findet Gleichrichtung statt. Der Durchlaßstrom beginnt erst zu fließen, wenn die angelegte Spannung in Durchlaßrichtung einen bestimmten Schwellenwert, gleich der Diffusionsspannung, übersteigt. (Germanium: 0,4 V, Silizium 0,8 V).

Der Strom in Sperrichtung („Sperrstrom“) kann etwa 10^7 mal kleiner als der Durchlaßstrom sein. Er verschwindet nicht völlig, da immer eine geringe Zahl von Elektronen im p- und Löchern im n-Gebiet vorhanden ist und ständig neue Ladungsträgerpaare an Störstellen des Kristallgitters entstehen. Der Sperrstrom wächst mit steigender Temperatur stark an.

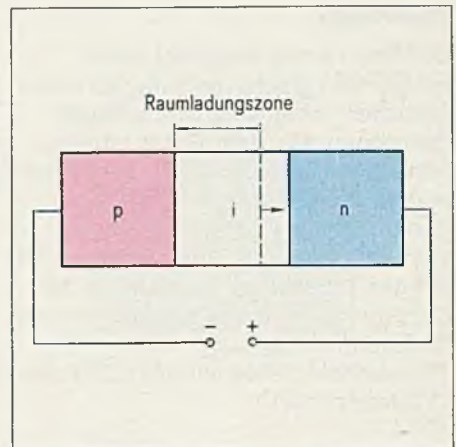
Beim Umschalten von Durchlaß- in Sperrichtung tritt eine Schaltverzögerung auf, da das Ausräumen des pn-Übergangs von Ladungsträgern eine bestimmte Zeit beansprucht. Bei Schaltdioden kann die Schaltzeit auf 10^{-8} Sek. gesenkt werden.



Kennlinien von Dioden

Gleichrichter für sehr hohe Sperrspannungen (einige Kilovolt)

Zwischen p- und n-Gebiet wird eine etwa 0,2 mm breite undotierte Kristallzone (i-Zone) beibehalten. Die Raumladungszone kann sich bei Erhöhen der Sperrspannung über die ganze i-Zone ausdehnen. Bei Polung in Durchlaßrichtung wird die i-Zone von beiden Seiten mit Ladungsträgern überschwemmt.



p-i-n-Gleichrichter

Dioden für spezielle Anwendungen

Für spezielle Anwendungen gibt es verschiedene Arten von Dioden z. B.

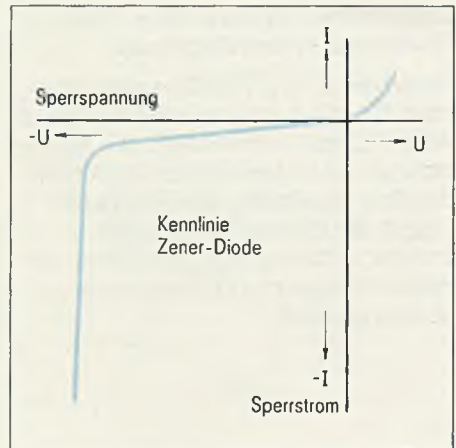
- Zenerdioden
- Kapazitätsdioden
- Schottkydioden

Zenerdiode

Der Sperrstrom steigt bei einer bestimmten Sperrspannung abrupt an. Ursachen: Loslösung gebundener Elektronen aus dem Gitter infolge hoher Feldstärke (= Zener effekt) oder infolge Stößen von sehr schnellen Elektronen (lawinenartige Trägervermehrung durch Stoßionisation). Die Art der Ursache und die Größe der Durchbruchspannung hängen von der Dotierung ab.

„Zener effekt“ 1934 von dem Physiker C. Zener erklärt.

Anwendung: Stabilisierung von Spannungen, Begrenzung von Signalen

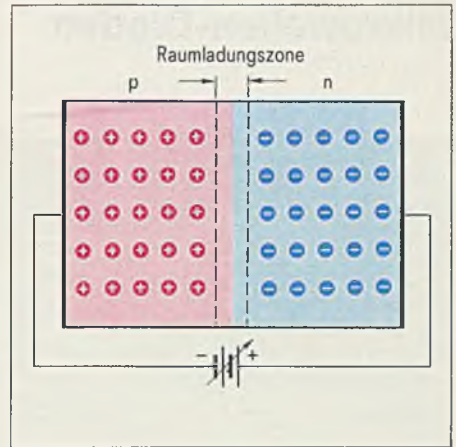


Kapazitätsdiode

Die Raumladungszone an der pn-Sperrschicht wirkt wie ein Kondensator, dessen Ladungen räumlich verteilt sind.

Änderung der Spannung an der Diode verändert die Dicke dieser Zone und somit die Kapazität des pn-Übergangs (höhere Spannung → breitere Raumladungszone → kleinere Kapazität).
Analogie: Auseinanderziehen zweier Kondensatorplatten.

Anwendung: Abstimmen von Schwingkreisen.



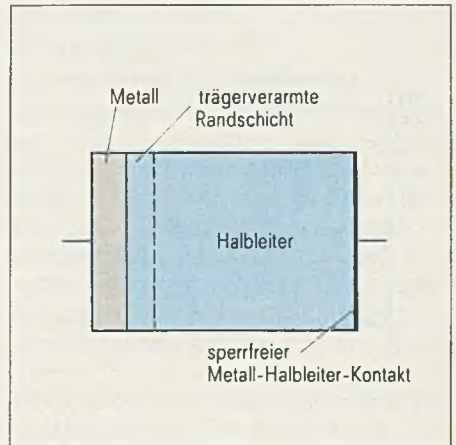
Schottkydiode

Statt pn-Übergang wirkt ein Metall-Halbleiter-Kontakt als Sperrschicht. Ursache: Unterschiedliche Austrittsarbeit der Elektronen aus dem Halbleiter und dem Metall erzeugt trägerverarmte Randschicht im Halbleiter. Sperrschichteffekt 1874 von F. Braun entdeckt, 1939 von W. Schottky theoretisch erklärt.

Gegenüber Diode mit pn-Übergang keine Trägheit beim Umschalten von Durchlaß- in Sperrichtung, deshalb zur Gleichrichtung für höchste Frequenzen geeignet.

Sperrschichtfreie Metall-Halbleiter-Kontakte erhält man nur bei bestimmten Metall-Halbleiter-Kombinationen

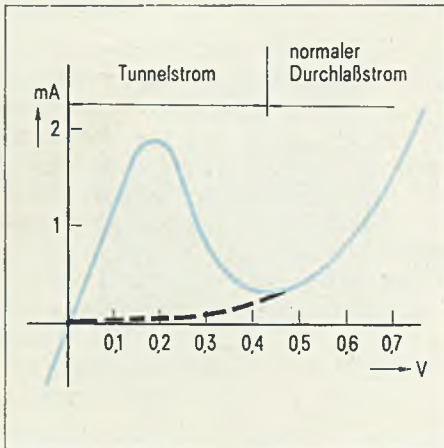
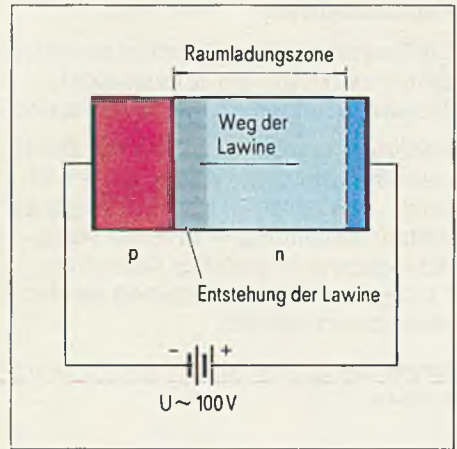
Anwendung: Schnelle Schalter, Mikrowellen-Gleichrichter



Mikrowellen-Dioden

Zur Erzeugung oder Verstärkung von Schwingungen im Mikrowellenbereich werden

- Tunneldioden
- IMPATT-Dioden
- Gunn-Elemente
- Speichervaraktoren eingesetzt.



Typische Tunneldioden-Kennlinie

Tunneldioden

Ladungsträger „durchtunneln“ bereits bei niedrigen Spannungen, vor Einsetzen des Durchlaßstromes, die durch hohe Dotierung der p- und n-Zonen gewonnene schmale Raumladungszone.

Sie erzeugen einen „Tunnelstrom“ mit teilweise abfallender Dioden-Kennlinie.

Anwendung: Rauscharme Verstärker, Empfangsoszillatoren im Gigahertz-Bereich, schnelle Schalter.

IMPATT-Dioden

(Lawinen-Laufzeit-Dioden)

Übersteigt die Sperrspannung am pn-Übergang einen kritischen Wert (die Durchbruchspannung), so entsteht durch Stoßionisation im Gebiet höchster Feldstärke eine Ladungsträgerlawine. Diese durchläuft die schwach dotierte i-Zone und gelangt zur Auffangelektrode. Durch Abstimmung der Laufzeit, die von der Länge der i-Zone abhängt, mit der Frequenz eines Resonators, lassen sich Oszillatoren im Frequenzbereich von 3 bis 300 GHz mit hoher Impulsleistung herstellen.

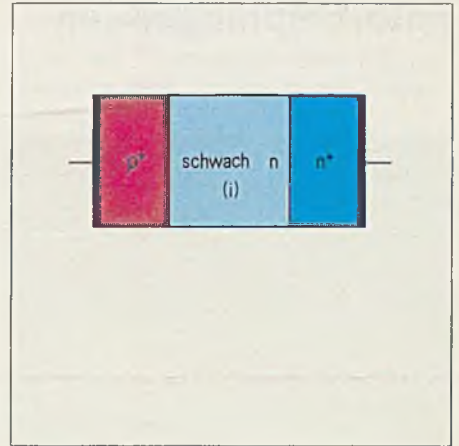
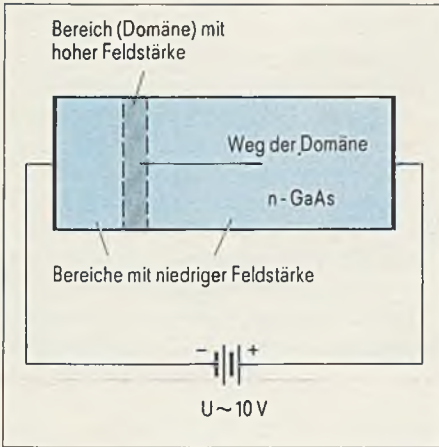
(Impatt = **I**mpact Ionisation **A**valanche **T**ransit Time)

Anwendung: Mikrowellen-Verstärker und Oszillatoren

Trapatt-Dioden: Impatt-Dioden, deren Betrieb extrem hohe Felder benötigt. Bei entsprechender äußerer Schaltung breitet sich das Ionisationsgebiet über die ganze Raumladungszone hinweg aus. Es entsteht ein Ladungsträgerplasma.

(Trapatt = **T**rapped **P**lasma **A**valanche **T**riggered **T**ransit).

Anwendung: Gepulste Sender



Gunn-Elemente

bestehen aus homogenen n-Gallium-Arsenid-Kristallen ohne pn-Übergang. Mit steigender Spannung nimmt die Geschwindigkeit der Elektronen zu. Bei einer bestimmten kritischen Feldstärke nimmt die Geschwindigkeit infolge einer verstärkten Bindung der Elektronen an das Kristallgitter wieder ab. Da diese Feldstärke nur in einer schmalen Zone auftritt, entsteht ein Elektronenstau, eine „Hochfelddomäne“, die durch den Kristall wandert. Domänenaufbau, Wandern und Verschwinden bilden einen zyklisch-periodischen Vorgang, der zur Schwingungserzeugung benutzt wird.

Gunn-Effekt 1964 von J. O. Gunn beschrieben.

Anwendung: Mikrowellen-Oszillator

Speichervaraktoren (Snapp-off Varactors)

Bei Polung in Flußrichtung werden Ladungsträger in der schwach dotierten n-Zone gespeichert. Beim Umpolen in Sperrichtung erfolgt der Ladungsträgerrückzug, der nach Entleerung der Zone abrupt aufhört. Dieser Vorgang (100 psec) ist sehr oberwellenhaltig und wird zur Leistungserzeugung von Mikrowellen ausgenutzt (bis 60 GHz).

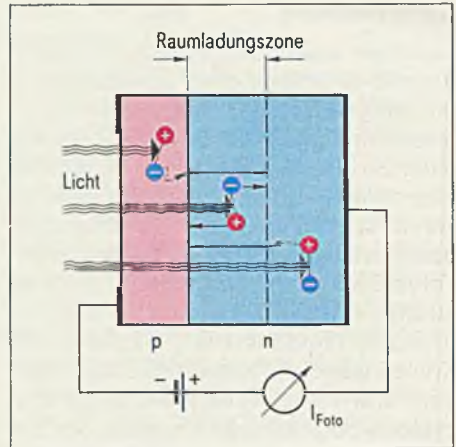
PIN-Dioden sind eine Sonderform der Varaktordioden. Sie werden als Schalter oder variable Widerstände im Mikrowellenbereich eingesetzt.

Foto-Empfänger

wandeln Lichtsignale in elektrische Strom- und Spannungssignale um.

Fotodiode

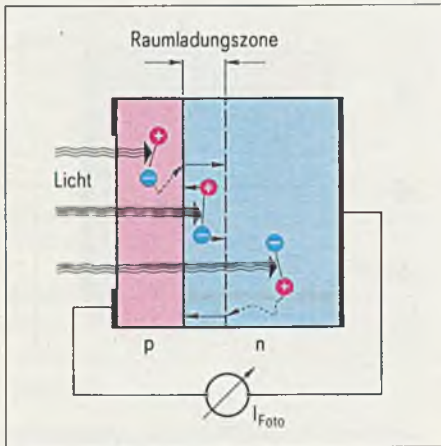
Einfallendes Licht löst Elektronen aus der Gitterbindung. Es entstehen dadurch zusätzlich freie Elektronen und Löcher. Sie wandern zur Raumladungszone und erhöhen den Sperrstrom (= Fotostrom) proportional zur Lichtintensität.



Anwendung: Lichtmessung (z. B. Fotografie), Lichtschranken, Positionierung von Werkzeugmaschinen, Fernsteuerung mit Infrarotstrahlung, Infrarot-Tonübertragung, allgemein zum Nachweis hochfrequenter Lichtsignale.

Fotoelement

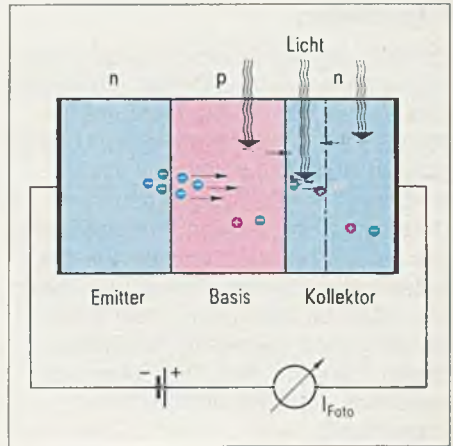
Wie bei der Fotodiode entstehen durch Lichteinfall freie Ladungsträger. Im Gegensatz zur Fotodiode wird am pn-Übergang keine Spannung von außen angelegt. Erreichen die Elektronen und Löcher den pn-Übergang, werden sie durch das innere Feld der Raumladungszone getrennt. Es entsteht eine Fotospannung, die im Außenkreis einen Fotostrom liefert. Lichtenergie wird dabei in elektrische Energie umgewandelt.



Anwendung: Erzeugung elektrischer Energie durch Solarzellen (Wirkungsgrad etwa 11%), Lichtmessung.

Fototransistor

Er ist ein Transistor (s. Seite 24), der sich wie eine Fotodiode mit eingebautem Verstärker verhält. Als lichtempfindliche Diode wirkt der Basis-Kollektor-pn-Übergang. Der dort entstehende Fotostrom fließt auch über den Emitter. Dieser Emitterstrom verstärkt durch den Transistoreffekt den ursprünglichen Fotostrom etwa 500fach.



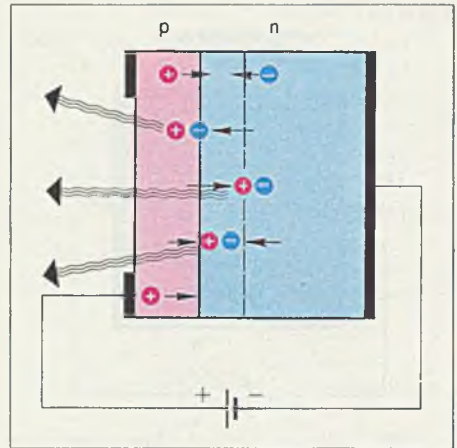
Anwendung: Lichtkontroll- und Regelgeräte, Lochkarten- und Lochstreifen-Abtastung, optoelektronische Koppel-elemente (s. Seite 23).

Lumineszenzdioden (LED)

sind lichtemittierende Dioden. Sie wandeln elektrischen Strom in Licht oder Infrarotstrahlung um.

Arbeitsweise:

Umkehrung des Fotodioden-Effektes. Freie Elektronen und Löcher vereinigen sich und senden dabei Licht aus. Die LED (= Licht emittierende Diode) besteht aus einem Kristall mit pn-Übergang. Beim Anlegen einer Durchlaßspannung wandern Elektronen aus der n-Zone und Löcher aus der p-Zone über den pn-Übergang hinweg. Sie rekombinieren, d.h. freie Elektronen gehen wieder in den gebundenen Zustand über. Die dabei freiwerdende Energie wird als Licht abgestrahlt.



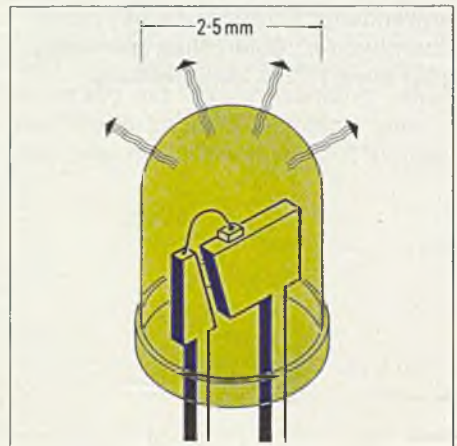
Allgemeines:

Kristallart und Dotierung bestimmen die **Farbe** des Lichts:

- GaAs: infrarot
- GaAsP je nach Phosphor-Gehalt: rot bis gelb
- GaP mit Zink- und Sauerstoffdotierung: rot
- GaP mit Stickstoff-Dotierung: grün und gelb

Kristalle mit **zwei** entsprechenden pn-Übergängen strahlen in rot, grün oder gelb, je nach angelegter Spannung.

Lumineszenzdiode in durchscheinender Plastikumhüllung



Vorteile gegenüber Glühlämpchen:
 Lebensdauer 100 mal länger, dann kein
 plötzliches Versagen, sondern Abfall
 der Lichtleistung.
 Ansprechzeit 10^6 mal schneller
 (~ 10 ns),
 montagefreundliche Bauformen,
 die sehr hohe Packungsdichte zulassen,
 mechanisch unempfindlicher.

Anwendung von LED:

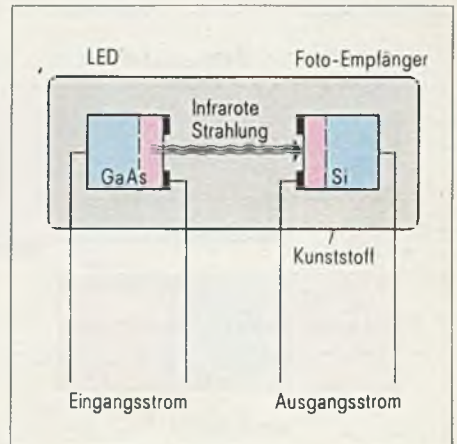
Signallämpchen, Lichtquelle für Licht-
 schranken, Ziffern- und Buchstaben-
 anzeigen.

Optoelektronisches Koppellement

Lumineszenzdiode und Fotodiode
 oder Fototransistor (Lichtsender und
 -empfänger, s. Seite 21) in einem Ge-
 häuse stellen ein Koppellement dar.
 Ein Strom im Lumineszenzdioden-
 Kreis erzeugt Licht, das Licht erzeugt
 einen Strom im Fotoempfänger-Kreis.
 Der Koppler wirkt wie ein Relais.

Vorteile gegenüber mechanischen
 Relais:
 Höhere Schaltgeschwindigkeit,
 keine mechanische Abnutzung,
 hohe Isolation zwischen den beiden
 Stromkreisen.

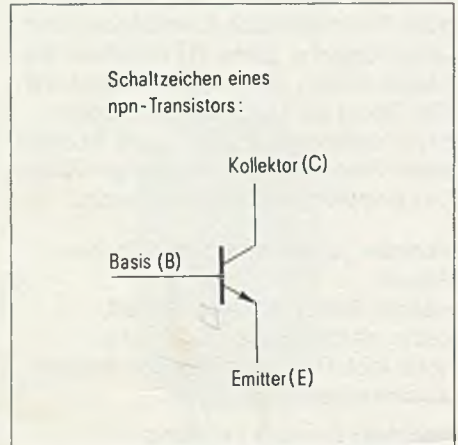
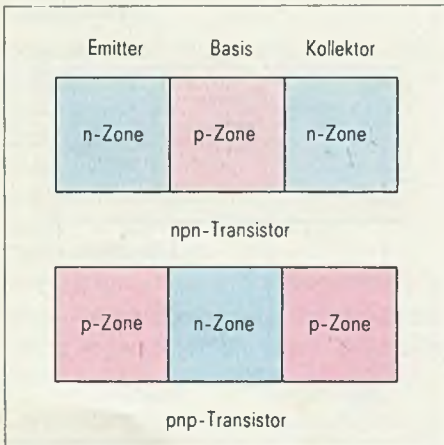
Nachteil: Geringe Leistung



Der bipolare Transistor

wirkt als Verstärker elektrischer Signale (Kristallverstärker) oder als Schalter

Er heißt „bipolar“, da im Gegensatz zum Feldeffekt-Transistor (s. Seite 32) Ladungsträger beider Polaritäten (Löcher und Elektronen) beteiligt sind. Der bipolare Transistor besteht aus drei Zonen unterschiedlicher Leitfähigkeit: pnp oder npn.



Wirkungsweise des npn-Transistors (gilt analog auch für den pnp-Transistor)

Der Transistor besitzt zwei pn-Übergänge, den einen zwischen Emittor und Basis, den anderen zwischen Basis und Kollektor. Zwischen Basis und Kollektor wird eine Spannung in Sperrrichtung angelegt (U_{CB}). Im Kollektorkreis fließt ein kleiner Strom I_C (Kollektor-Sperrstrom). Wird an den Emittor-Basis-pn-Übergang eine Spannung in Flußrichtung angelegt (U_{EB}), werden Elektronen vom Emittor in die Basiszone „emittiert“ (= Emittorstrom). Bis auf einen geringen Anteil durchwandern diese Elektronen die Basis. Sie geraten in das elektrische Feld des Basis-Kollektor-pn-Übergangs und verstärken den Kollektorstrom.

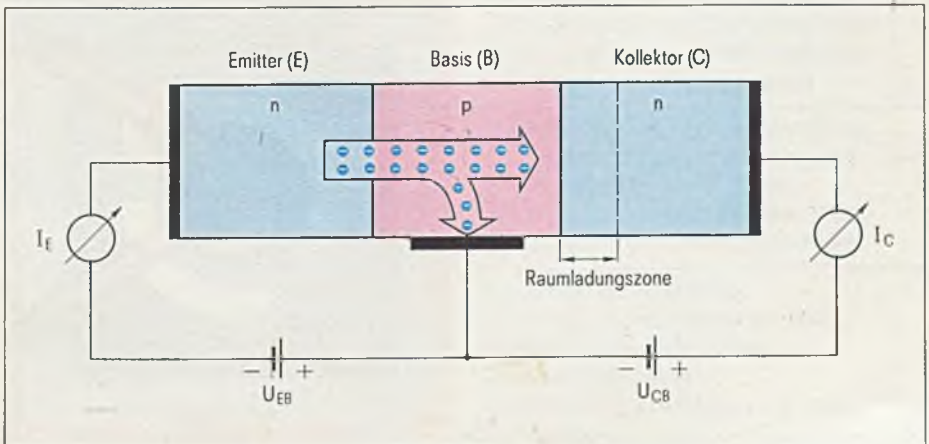
Nach ihren Technologien unterscheidet man:

Legierungstransistor (Seite 10)
(NF-Transistor)

Mesa-Transistor. Zur Erzielung besonders kleiner Strukturen sind Emittor und Basis in einer tafelförmigen Erhebung („Mesa“) untergebracht, die aus dem Kristall herausgeätzt ist.
Große Bedeutung für die Herstellung von Ge-UHF-Transistoren.

Planar-Transistor (Seite 26)

Epibasis-Transistor, einfach- und dreifachdiffundierter Transistor (Seite 28)

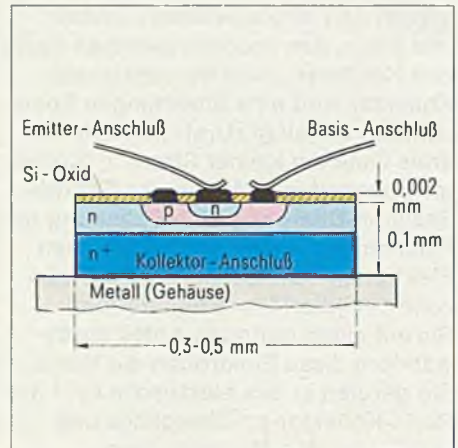


Der Silizium-Transistor in Planartechnik

Von allen Technologien zur Herstellung von Transistoren und anderen Halbleiterbauelementen ist die Planartechnik die bedeutendste.

Planartransistoren sind

- besonders zuverlässig durch den Schutz des Si-Oxids,
- geeignet für hohe Frequenzen durch ihre kleinen Dimensionen,
- billig in ihrer Systemherstellung, da Tausende von Systemen auf einer Scheibe gleichzeitig gefertigt werden.



Schnitt durch einen npn-Planar-Transistor ▶



Planartransistor (von oben gesehen) ▶

Herstellungsgang für zwei nebeneinanderliegende Planar-Transistor-Systeme



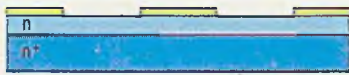
Ausgangsmaterial:
 n^+ -Si-Einkristall-Scheibe, hochdotiert,
 ϕ 50–75 mm, Dicke 0,3 mm



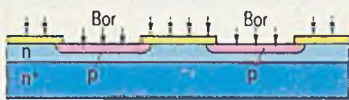
Epitaxie:
 Aufwachsen einer n-dotierten Si-Schicht von etwa 10 μm Dicke (Kollektor-Schicht)



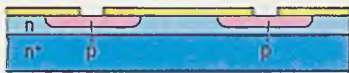
1. Oxidation:
 Erzeugung einer SiO_2 -Schicht von etwa 2 μm Dicke.



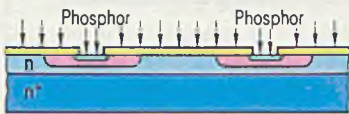
Ätzvorgang:
 Ätzen von Fenstern in die Oxidschicht mit Hilfe von Masken (Fotolithografie)



Basis-Diffusion:
 Boratome diffundieren durch die Oxidfenster in den Kristall und erzeugen die p-leitende Basiszone



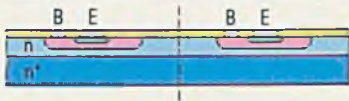
2. Oxidation/Ätzvorgang:
 Oberflächen wieder zuoxidieren und Fenster für die Emitter-Diffusion ätzen.



Emitter-Diffusion:
 Phosphoratome diffundieren durch die Oxidlöcher und erzeugen die n-leitende Emitterzone.



3. Oxidation/Ätzung/Metallbelegung:
 Oberfläche wieder zuoxidieren und Löcher für die Metallkontakte ätzen. Ganzflächige Bedampfung mit Metall (z. B. Aluminium).



Leitbahnätzung/Rückseitenschliff:
 Entfernen des Metallbelages bis auf die Emitter- und Basisanschlüsse. Abschleifen der Rückseite bis auf 0,1 mm Kristalldicke.



Trennung der Systeme:
 Ritzen der Kristallscheibe und Brechen in die einzelnen Transistorsysteme.
 Kontaktieren und Einbau in das Gehäuse

Silizium- Leistungstransistoren

Für große Leistungen treten neben die Planartechnik die Transistortechnologien

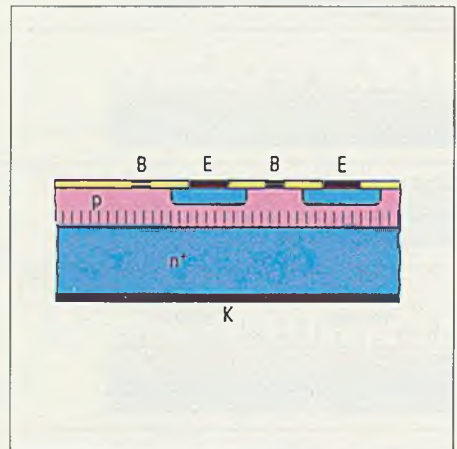
- Epibasis
- Einfachdiffusion
- Dreifachdiffusion

Epibasistransistoren

Auf einem n^+ -leitenden Si-Kristall entsteht die p-leitende **Basisschicht** durch ganzflächige **Epitaxie**. Emitter und Kontaktierung werden wie bei der Planartechnik hergestellt.

Epibasistransistoren besitzen gegenüber Planartransistoren eine dickere und homogen dotierte Basis. Dadurch höhere Belastbarkeit infolge schwächerer elektrischer und thermischer Verkopplung des Kollektors mit dem Emitter.

nnp- und pnp-Transistoren möglich.
Verlustleistung: bis etwa 90 W (15 A) *
Grenzfrequenz: 5 MHz.

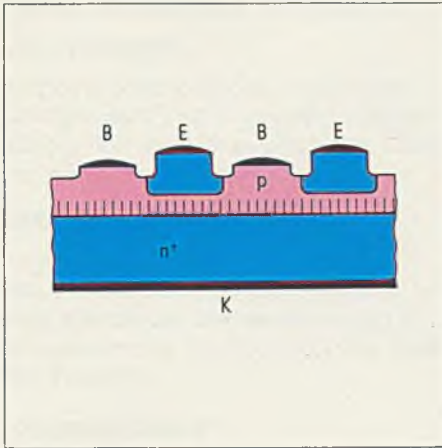


||| = Ausdehnung der Raumladungszone

Anwendung:

Kfz-Elektronik
Komplementäre Ton-Endstufen
Universeller Schalttransistor

* bei Einbau in gut wärmeableitende Gehäuse (Metall oder Plastik)



Einfachdiffundierte Transistoren (single diffused transistors)

Ausgangsmaterial: p-Si-Kristall-Scheibe. Emitter und Kollektor werden gleichzeitig von beiden Seiten in einem einzigen Diffusionsschritt n^+ -dotiert. Kollektor ganzflächig, Emitter meist fingerförmig strukturiert.

Die Basisweite ist noch größer als bei Epibasistransistoren. Der einfachdiffundierte Transistor ist deshalb besonders robust und bei noch höheren Leistungen einsetzbar, allerdings auf Kosten der Schaltgeschwindigkeit.

Nur npn-Transistoren möglich.

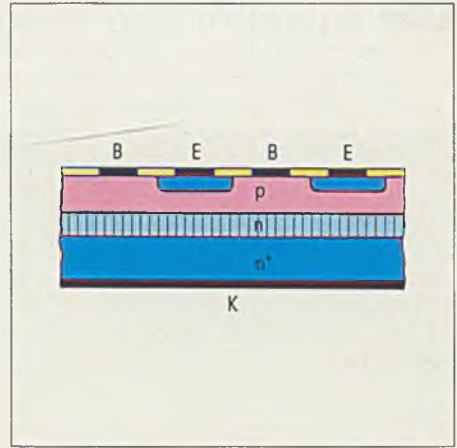
Verlustleistung: bis etwa 120 W (15 A) *

Grenzfrequenz: 1 MHz.

Anwendung:

Leistungsschalter

Lineare Regler in Netzgeräten



Dreifachdiffundierte Transistoren (triple diffused transistors)

Ausgangsmaterial: schwach n-dotierte Si-Kristall-Scheibe.

Die erste Diffusion (Phosphor) erzeugt die untere, stark dotierte n^+ -Zone.

Die zweite Diffusion (Bor) bildet die ganzflächige p-Basiszone. Die dritte Diffusion (Phosphor) erzeugt wie bei der Planartechnik die n-Emitter-Zonen.

Gegenüber Epibasis- und einfachdiffundierten Transistoren besitzen dreifachdiffundierte Transistoren eine breite, schwach dotierte Kollektorzone (20 bis 40 μ), in die sich die Raumladung bei hohen Spannungen ausdehnen kann.

Nur npn-Transistoren üblich.

Verlustleistung: bis etwa 200 W *

Vorteile: Kollektorspannungen von einigen Kilovolt, kurze Schaltzeiten.

Anwendung:

Kfz-Zündung

Horizontablenkung in Fernsehgeräten

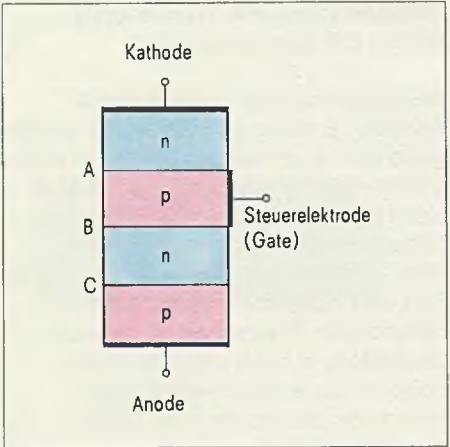
Geschaltete Netzgeräte

Der Thyristor und Triac

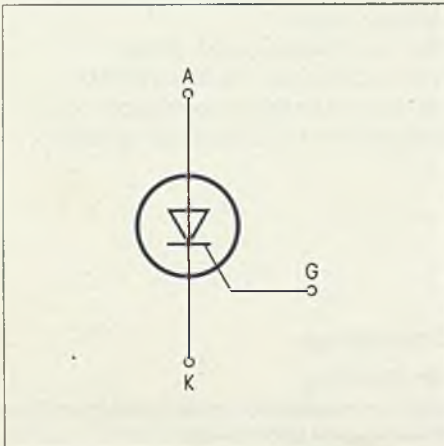
Der Thyristor

(SCR-Silicon Controlled Rectifier) wirkt wie eine Diode, deren Durchlaßstrom gesteuert werden kann. Er ist ein bistabiles Schaltelement.

Der Thyristor hat 4 Zonen unterschiedlicher Dotierungsart (pnpn) und damit 3 pn-Übergänge, sowie drei Anschlüsse („Vierschicht-Triode“).



▲ Schematischer Aufbau eines Thyristors (A, B, C = pn-Übergänge)



◀ Schaltzeichen für einen Thyristor

Betriebszustände des Thyristors:

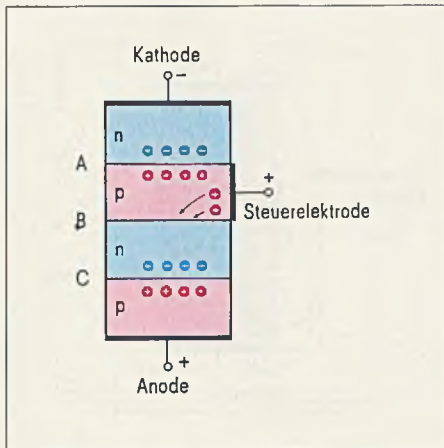
„Sperrzustand“

Kathode positiv, Anode negativ. pn-Übergänge A und C gesperrt. Unabhängig von der Steuerelektrode fließt nur ein geringer Sperrstrom.

„Blockierzustand“

Anode positiv, Kathode negativ, Steuerelektrode null oder negativ gegen Kathode. Der pn-Übergang B ist gesperrt. Es fließt kein Strom durch den Thyristor.

„Durchlaßzustand“



Anode positiv, Kathode negativ wie im Blockierzustand. Durch eine positive Spannung an der Steuerelektrode wird der pn-Übergang B mit Ladungsträgern überschwemmt. Er wird niederohmig leitend.

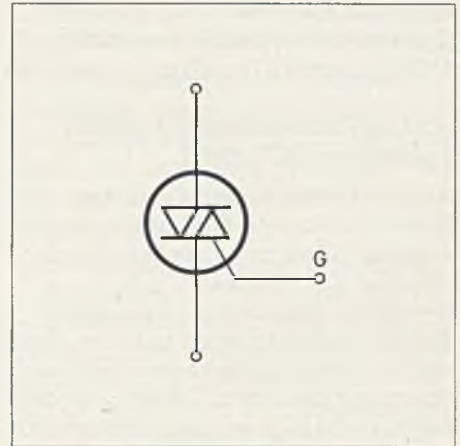
Der Thyristor „zündet“.

Der Anodenstrom bleibt auch ohne weiteren Steuerstrom bestehen. Er muß zum Löschen des Thyristors kurzzeitig unter einen bestimmten Schwellenwert (Haltestrom) erniedrigt werden.

Der Triac

Zwei parallel und entgegengesetzt orientierte Thyristor-Strukturen auf dem gleichen Kristallplättchen (Chip) bilden das Bauelement Triac, das im Gegensatz zum Thyristor Ströme in beiden Richtungen schalten kann.

Schaltzeichen für einen Triac



Anwendung von Thyristor und Triac: Steuerung und Schaltung von Wechselströmen (z. B. Helligkeitssteuerung, Drehzahlregelung von Motoren).

Diac: Zwei gegenpolig hintereinandergeschaltete Dioden (pn-np) auf einem Si-Kristall. Betrieb mit Wechselspannung ergibt bei Überschreiten der Dioden-Durchbruchspannung scharfe Stromimpulse, die zum Triggern von Triacs geeignet sind.

Der Feldeffekt-Transistor (FET)

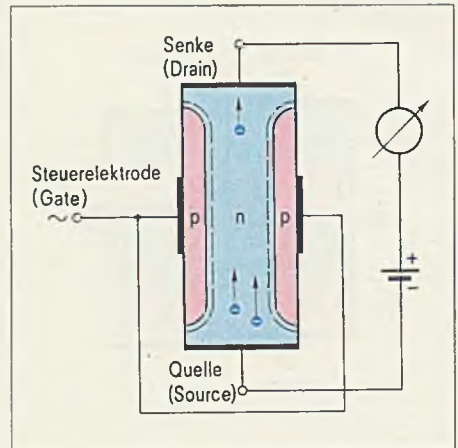
Im Gegensatz zum bipolaren Transistor arbeitet der Feldeffekt-Transistor nur mit Ladungsträgern einer Sorte, Elektronen oder Löchern (Unipolartransistor).

Man unterscheidet:
Sperrschicht-Feldeffekt-Transistor,
MOS-Feldeffekt-Transistor (s. Seite 34)

Sperrschicht-Feldeffekt-Transistor (= Junction-FET, JFET)

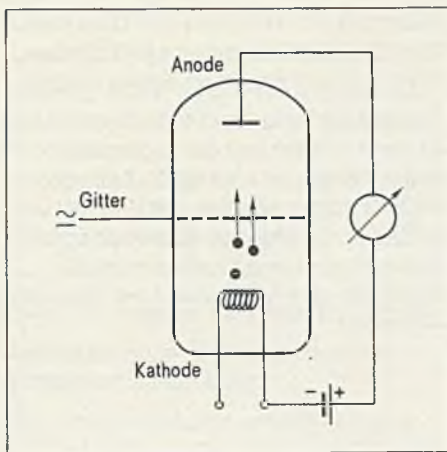
An den Enden eines n-leitenden Kristalls wird eine Gleichspannung angelegt. Elektronen fließen von der „Quelle“ zur „Senke“.

Die Breite des Kanals wird von zwei seitlich eindiffundierten p-Zonen und der an diesen anliegenden negativen Spannung bestimmt. Erhöht man die negative Gate-Spannung, dehnen sich die Raumladungszonen infolge „Feld-effekt“ in den Kanal hinein aus und schnüren die Strombahn ein. Die Spannung an der Steuerelektrode steuert somit den Strom zwischen Quelle und Senke.



Anwendung:

Sperrschicht-FET werden vorwiegend als Verstärker für analoge Signale eingesetzt, MOS-FET als digitale Schaltelemente in der Großintegration (s. Seite 46).



Unterschied zwischen bipolarem Transistor und Feldeffekt-Transistor:

Die Wirkungsweise des bipolaren Transistors basiert auf der Injektion von Ladungsträgern vom Emitter in die Basis. Der „Injektions-Transistor“ ist stromgesteuert und „bipolar“ (siehe Seite 24).

Bei Feldeffekt-Transistoren wird die Leitfähigkeit des Kristalls zwischen zwei Elektroden durch eine Spannung gesteuert. Der Strompfad wird dabei eingeschnürt oder erweitert. Der FET ist „unipolar“, d. h. am Stromfluß sind nur Ladungsträger einer Art beteiligt.

Der Sperrschicht-Feldeffekt-Transistor ist das Analogon zur Verstärker-Röhre.

In der Röhre fließt zwischen Kathode und Anode im Vakuum ein Elektronenstrom. Die Spannung am Gitter steuert diesen Elektronenstrom: positive Spannung verstärkt ihn, negative Spannung vermindert ihn.

Der MOS-Transistor (MOS-FET)

(metal-oxide-semiconductor Feldeffekt-Transistor)

Eine Steuerspannung beeinflusst die Leitfähigkeit einer dünnen Oberflächenschicht im Halbleiterkristall.

Der MOS-Transistor ist von entscheidender Bedeutung für die Großintegration (S. 46).

Beispiel:

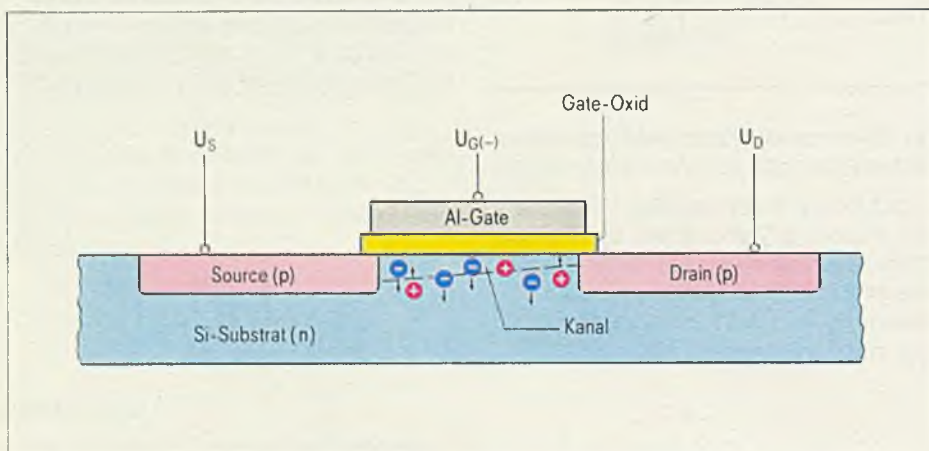
p-Kanal MOS-Transistor, Anreicherungstyp.

Ohne Spannung an der Gate-Elektrode (U_G) fließt zwischen Source und Drain kein Strom. Die pn-Übergänge sperren den Strom.

Durch eine neg. Spannung am Gate werden Elektronen in das Kristallinnere verdrängt, Löcher an die Oberfläche gezogen. Es entsteht eine schmale

p-leitende Schicht unter der Oberfläche (Kanal). Zwischen beiden p-Gebieten, Source und Drain, kann Strom fließen.

Eine Sonderform des MOS-Transistors, mit zwei hintereinanderliegenden Steuer-Gates, ist die MOS-Tetrode. MOS-Tetroden werden als Einzelhalbleiter für analoge Anwendungen in Verstärker- und Oszillatorschaltungen für den VHF- und UHF-Bereich eingesetzt.



p-Kanal MOS-Transistor im Querschnitt



Zwei technologische Grundarten:

p-Kanal MOS: (siehe Bild) Silizium-Substrat n-leitend, Source und Drain p-dotiert.

Kanalbildung durch Anreicherung von positiven Ladungen an der Silizium-Oberfläche in der Kanalzone.

n-Kanal MOS: Silizium-Substrat p-leitend, Source und Drain n-dotiert. Kanalbildung durch Anreicherung von negativen Ladungen an der Silizium-Oberfläche in der Kanalzone.

Zwei Grundarten der Schaltzustände:

Anreicherungs- (enhancement-) Transistor (siehe Bild)

Kanalbildung durch eine Spannung am Gate. Ohne Gatespannung Transistor nichtleitend.

Verarmungs- (depletion-) Transistor

Permanenter Kanal vorhanden durch Dotierung der Kanalzone. Ohne Gatespannung Transistor leitend. Abschalten des Transistors durch eine Gatespannung.

p-Kanal MOS-Transistoren sind aus technologischen Gründen vorwiegend vom Anreicherungstyp.

n-Kanal MOS-Transistoren sind aus technologischen Gründen vorwiegend vom Verarmungstyp.

Schwellenspannung: Die Gatespannung, welche mindestens benötigt wird, um **einen Kanal zu erzeugen oder zu beseitigen.**

Sie beträgt bei der **MOS-Hochvolttechnik** typ. 2,5–4 Volt
MOS-Niedervolttechnik typ. 0,8–2 Volt

Stromrichtung: Bei ausgebildetem Kanal ist der Transistor **in beiden Richtungen leitend.**

Schichtschaltungen

Schichtschaltungen sind miniaturisierte RC- und Leitungsnetzwerke in

Dickschicht-Technik oder Dünnschicht-Technik,

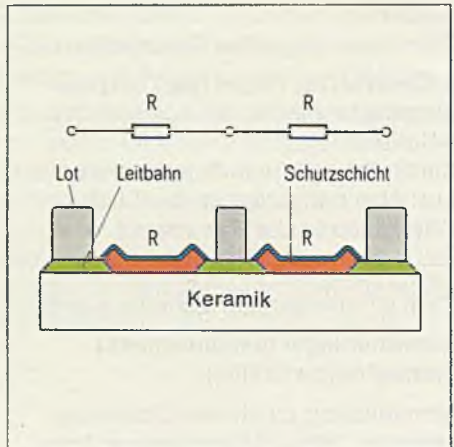
auf einem Keramik- oder Glas-Substrat

Dickschicht-Technik

Erzeugung von Leitbahnen, Widerständen und Kondensatoren mit **pastenförmigen Mischungen** aus Edelmetall-Legierungen als Leiter, dielektrischen Pulvern als Isolator, mit organischen Bindemitteln.

Die Pasten werden auf dem Substrat im **Siebdruckverfahren**

aufgebracht und erhalten durch einen **Einbrennprozeß** bei 730–1000 °C ihre Festigkeit und ihre elektrischen Eigenschaften. Elektrischer Abgleich mit Sandstrahl oder Laser.



Beispiel für eine Dickschicht-Schaltung (Querschnitt)

Anwendung:

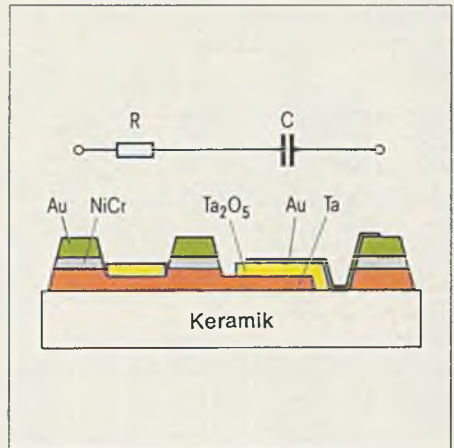
Widerstands- und RC-Netzwerke für niedrige Frequenzen

Dünnschicht-Technik

Erzeugung von Leitbahnen, Widerständen und Kondensatoren mit **dünnen Metall- und Oxidschichten**.

Diese werden im Vakuum durch **maskiertes Aufdampfen** (Au, NiCr, SiO) oder **Aufstäuben** (NiCr/Au, Ta, Ta₂O₅) und selektives Wegätzen auf einem Substrat aus Keramik, Glas oder Saphir aufgebracht.

Elektrischer Abgleich bei Au/NiCr mit Laserstrahl und bei Tantal durch anodische Oxidation.



Beispiel für eine Dünnschicht-Schaltung (Querschnitt)

Anwendung:

Widerstands- und RC-Netzwerke für hohe Frequenzen

Hybridschaltungen

Hybridschaltungen sind Schichtschaltungen mit zusätzlichen Einzelbauelementen (Kondensatoren, Dioden, Transistoren) oder Integrierten Halbleiterschaltungen

Vergleich von Hybridschaltungen mit monolithischen Integrierten Schaltungen:

Vorteile:

Die optimalen elektrischen Eigenschaften verschiedener Bauelemente, wie z. B.

hohe Schaltgeschwindigkeit

hohe Betriebsspannung und Ausgangsleistung

enge Toleranzen (durch Abgleich)

Digital- und Analogfunktionen (einschl. temperaturkompensierter Filter und Oszillatoren)

sind kombinierbar.

Außerdem:

kurze Entwicklungszeit

wirtschaftlich bei kleinen Stückzahlen

Nachteile:

höhere Fertigungskosten bei großen Stückzahlen

geringere Zuverlässigkeit

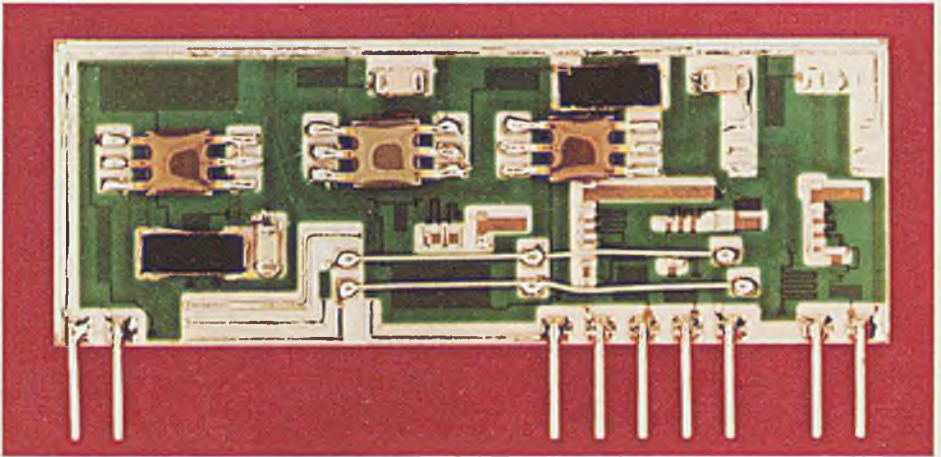
geringere Integrationsdichte

Anwendung:

Aktive Filter

Oszillatoren

D/A-Wandler



Beispiel:

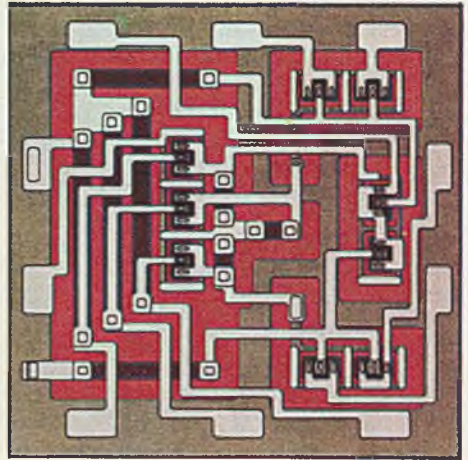
Dünnschicht-Hybridschaltung (aktives RC-Filter)
mit aufgelöteten Kondensatoren und Operationsverstärkern.
Größe ca. 80 × 25 mm.

Monolithische Integrierte Schaltungen

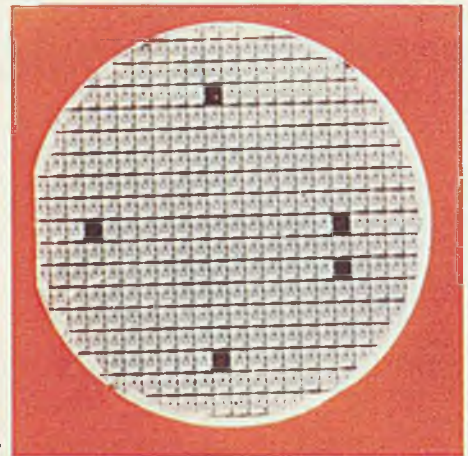
Alle Schaltungselemente werden in einem **gemeinsamen** Fertigungsprozeß (Planartechnik) auf **einem** einkristallinen Siliziumplättchen (Chip) hergestellt.

Dabei befinden sich, je nach Chipgröße, **80–1600 Schaltungen** auf einer runden Siliziumscheibe von ca. 5 cm Durchmesser.

Monolithische Integrierte Schaltung (9 Transistoren). Größe ca. $0,6 \times 0,6$ mm



Siliziumscheibe mit 270 Integrierten Schaltungen



Vorteile der Integration

- Niedrige Herstellungskosten bei großen Stückzahlen
- Hohe Zuverlässigkeit
- Hohe Temperatur-Stabilität
- Geringer Platz- und Leistungsbedarf
- Hohe Systemkomplexität wirtschaftlich erzielbar
- Kurze Entwicklungszeit für elektronische Schaltungen
- Ermöglicht batteriebetriebene Geräte hoher Komplexität.

Nachteile der Integration

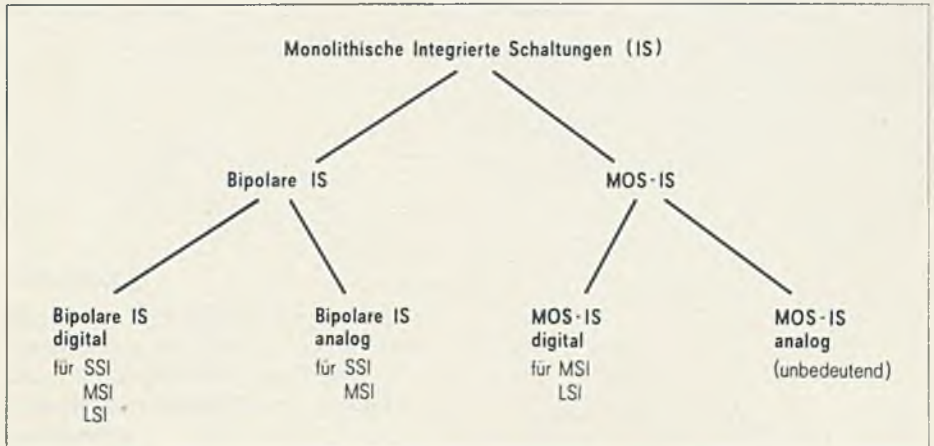
- Begrenzte Ausgangsleistung
- Induktivitäten nicht realisierbar
- Integrierte Schaltung durch Anwender nicht veränderbar.
- Hohe Entwicklungsvorleistung durch Bauelementehersteller.

Drei Integrationsstufen

SSI (small scale integration)	< 50	} Transistoren pro Baustein
MSI (medium scale integration)	50–500	
LSI (large scale integration)	> 500	

(Definition der Integrationsstufen nicht einheitlich)

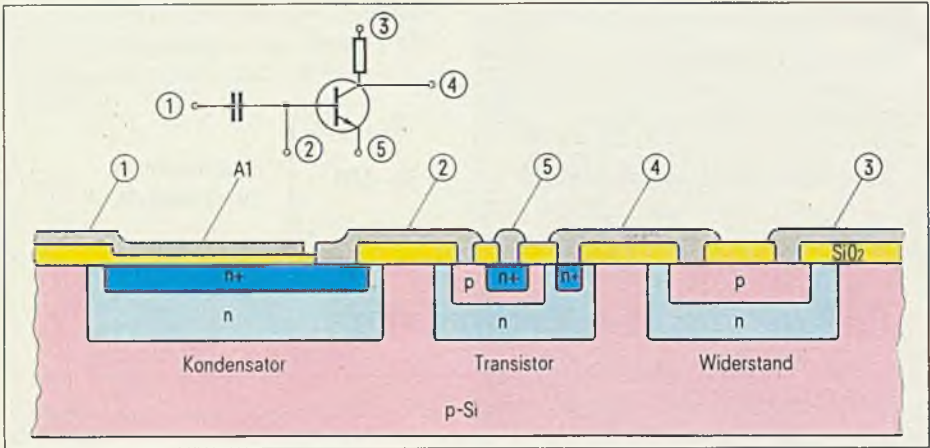
Einteilung nach Technologien:



Bipolare Integrierte Schaltungen

sind monolithische Analog- oder Digitalschaltungen in Si-Planartechnik mit bipolaren Transistoren, Dioden, Widerständen, Kondensatoren und Leitbahnen.

Beispiel für eine Integrierte Schaltung mit Transistor, Kondensator und Widerstand

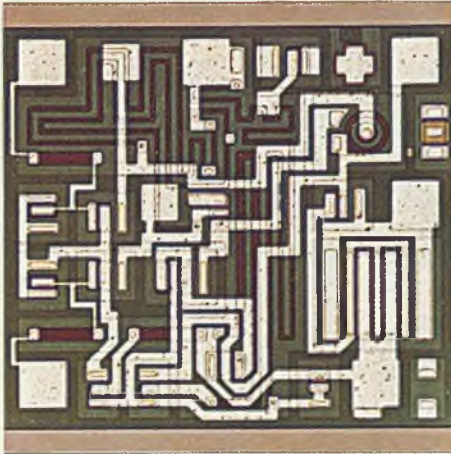


Schaltbild und Querschnitt

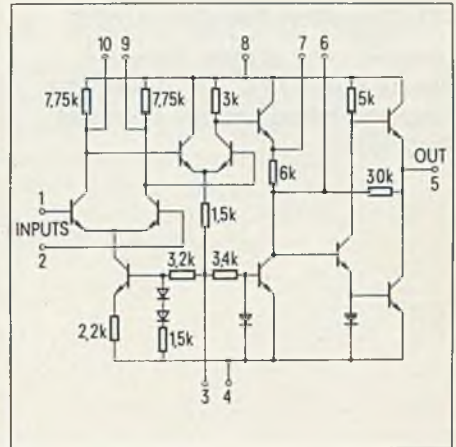
Bipolare Integrierte Schaltungen, analog

sind monolithische Schaltungen für die lineare Verstärkung und Verarbeitung elektrischer Signale

Beispiel: Operationsverstärker



Mikrofoto des Chip



Schaltbild

Anwendung:

Standard- und kundenspezifische Schaltungen für den Industrie- und Unterhaltungssektor, mit **hoher Temperatur-Stabilität** und **großer Bandbreite**

Bipolare Integrierte Schaltungen, digital

sind monolithische Schaltungen zur logischen Verknüpfung von digitalen, d. h. durch zwei Schaltzustände gekennzeichneten Signalen

TTL (Transistor-Transistor-Logic)

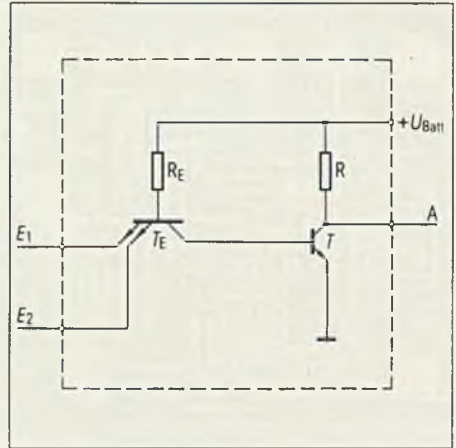
Umfassendste **digitale Standard-Bausteinfamilie** mit den **niedrigsten Bausteinpreisen** und der **weitesten Verbreitung**

Eigenschaften:

- Logische Verknüpfung durch Multi-Emitter-Transistoren
- Hohe Arbeitsgeschwindigkeit (Signallaufzeit typ. 10 ns/Stufe)
- Integrationsgrad SSI/MSI
- Geringe Störsicherheit (< 1 V)
- Hohe Verlustleistung (10 mW/Stufe)

Sonderformen:

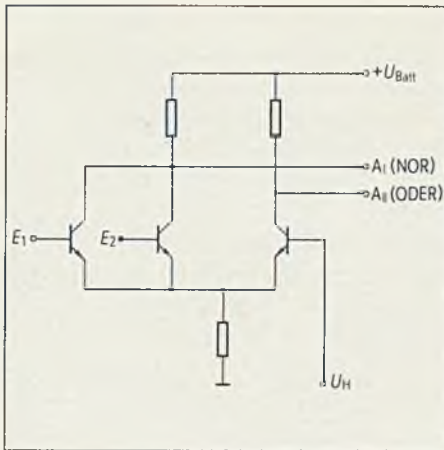
- „Low Power TTL“ mit geringer Verlustleistung (1 mW/Stufe)
- „Schottky-TTL“ für erhöhte Arbeitsgeschwindigkeit (3 ns/Stufe) (S. 48)



TTL-NAND-Gatter
(vereinfachtes Grundschaaltglied)

ECL (Emitter-Coupled-Logic)

Digitale Standard-Bausteinfamilie
für höchste Arbeitgeschwindigkeit



ECL-Logikgatter

(E_1 und E_2 Eingänge, A_I und A_{II} Ausgänge)

Eigenschaften:

Logische Verknüpfung durch emittergekoppelte Parallel-Transistoren
Signallaufzeit 1 ns/Stufe durch Betrieb der Transistoren nur im ungesättigten Bereich

Integrationsgrad SSI/MSI

Geringe Störsicherheit ($< 0,5V$)

Hohe Verlustleistung (30 mW/Stufe)

Sonderform: Oxid-isolierte ECL für höchste Geschwindigkeit (0,5 ns/Stufe)

LSL (langsame störsichere Logik)

Dioden-Transistor-Logik mit Zenerdioden zur Erzielung hoher Schaltschwellspannungen. Sie ist besonders für Anwendungen mit hohen Störsignalpegeln geeignet, z. B. in der Anlagen-Technik und bei Maschinensteuerungen.

DCTL (direct-coupled-transistor-logic)

RTL (resistor-transistor-logic)

DTL (diode-transistor-logic)

sind Techniken mit abnehmender Bedeutung

Großintegration

(LSI – Large Scale Integration)

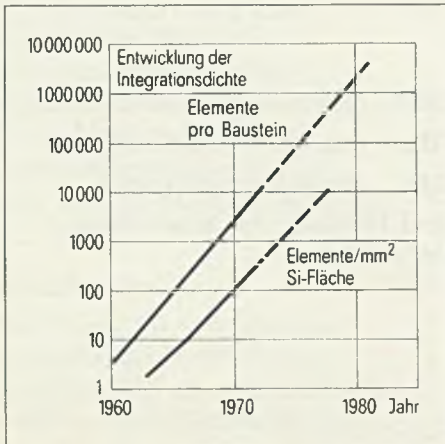
Erweiterung der Integrationstechnik zur Erzeugung von digitalen Schaltungen besonders hoher Integrationsdichte auf einem Siliziumkristall

Monolithische Großintegration wird auf einem Siliziumplättchen von 5–30 mm² Größe durchgeführt.

Sie ist gekennzeichnet durch **hohe Komplexität** der Schaltung (500–15000 Elemente/Baustein) und **hohe Zuverlässigkeit** (erreichbare Fehlerrate 0.15/10⁶ Std./Baustein) bei **geringem Leistungsverbrauch** (< 500 mW/Baustein) und **niedrigen Herstellungskosten** (< 1 Pf/Element)

Auswirkungen der Großintegration: Strukturwandel in der Geräteindustrie, gekennzeichnet durch verminderte Fertigungsstunden, verminderten Bedarf an Fertigungsfläche und Veränderungen in der Mitarbeiterstruktur.

Die Großintegration ermöglicht bei vielen Geräten den Übergang von der Mechanik zur Elektronik.



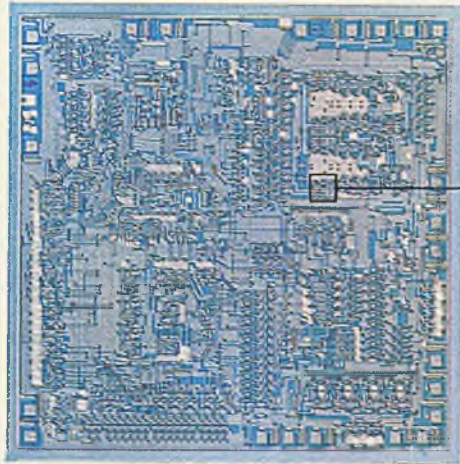
Weiterentwicklung:

Integrationsdichte von einer **Million Elementen auf 1 cm² großen Chips** in der Zukunft erreichbar.

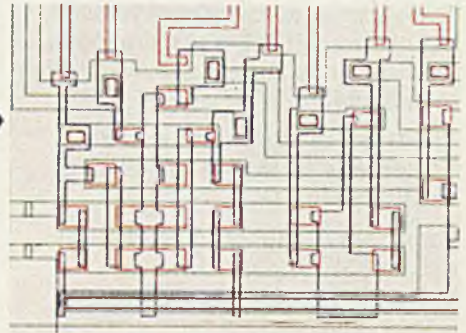
Technologien für die Großintegration:

Bipolar: Low Power Schottky TTL, Integrated Injection Logic

MOS: p-MOS, n-MOS, C-MOS, SOS, CCD



Beispiel: p-MOS Rechnerchip
16 mm², 1800 Transistoren,
500 mW Leistungsverbrauch



Vergrößerter Ausschnitt aus dem
Rechnerchip
(1 mm entspricht 5 μ m)

Anwendung von großintegrierten Schaltungen:

Standardbausteine wie Halbleiter-
speicher, Rechner und Mikrocomputer,
sowie kundenspezifische Logik-
schaltungen

Bipolare Techniken für die Großintegration

Weiterentwicklung der bipolaren IS-Technik zu höherer Integrationsdichte und geringerem Leistungsverbrauch

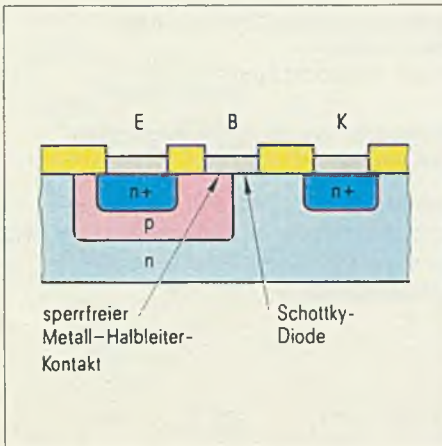
Low Power Schottky TTL (LS TTL)

Begrenzung des Sättigungsstroms der Transistoren durch Schottkydioden, parallel zu den E-B-pn-Übergängen. Dadurch hohe Arbeitsgeschwindigkeit (wie Standard-TTL).

Kleinere Strukturgrößen durch verbesserte Maskentechniken und Oxidisolations.

Geringere Leistungsaufnahme (2.5 mW/Stufe) durch ionenimplantierte hohe Widerstände.

Transistor mit Schottky-Diode



I²L (Integrated Injection Logic)

für **hohe Integrationsdichte** (250–400 Gatter/mm²)

und **hohe Arbeitsgeschwindigkeit** (25–250 ns/Stufe),

gekennzeichnet durch komplementäre Transistor-Paare (npn/pnp) mit Mehrfach-Kollektoren am npn-Transistor

niedrigstes Geschwindigkeits-Leistungs-Produkt (1 Pikojoule/Stufe)

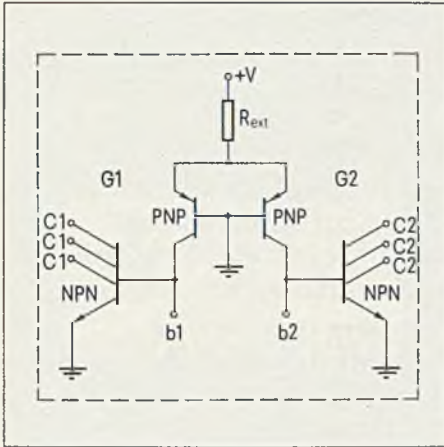
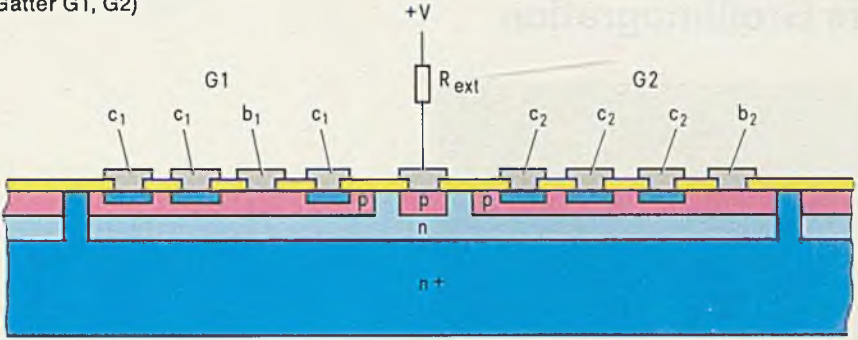
sehr geringe Verlustleistung (1–10 μ W/Stufe).

Außerdem:

Mit anderen Techniken (MOS, TTL) monolithisch kombinierbar

Auch analoge Funktionen möglich

I²L-Schaltungsaufbau
(Gatter G1, G2)

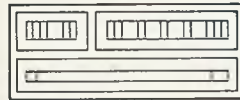


Zwei I²L-Gatterstrukturen (G1, G2),
Schaltbild

Größenvergleich
für 4-Eingangs-Gatter



Standard-TTL
(Fläche 34200 μ^2)



Low Power
Schottky TTL
(Fläche 12800 μ^2)



I²L
(Fläche 3000 μ^2)

MOS-Techniken für die Großintegration

Die MOS-Techniken bilden die wichtigste Basis für die Großintegration von Digitalschaltungen

MOS-Prozeß-Varianten

zur Erzielung unterschiedlicher elektrischer Eigenschaften von MOS-Schaltungen:

p-MOS mit Aluminium-Gates
(Standard p-MOS Prozeß)

p-MOS mit Silizium-Gates

p-MOS mit Verarmungs- und Anreicherungs-Transistoren

n-MOS mit Aluminium-Gates

n-MOS mit Silizium-Gates

C-MOS mit komplementären p-Kanal- und n-Kanal-Transistoren

In der Entwicklung:

SOS (Silizium auf Saphir)

CCD (Ladungsgekoppelte Schaltungen)

Entwicklungsziele:

Kleinere Strukturen

(z. B. durch Elektronenstrahl- oder Röntgenstrahl-Lithografie)

Höhere Arbeitsgeschwindigkeit

Geringere Verlustleistung

Kompatibilität mit Schaltungen anderer Technologien (insbesondere TTL)

Anwendungen:

Kundenspezifische MSI- und LSI-Schaltungen, Kleinrechner, Logikschaltungen, Datenspeicher (RAMs, ROMs, Schieberegister)

Vergleich der MOS-Techniken mit eingeführten bipolaren Techniken:

Vorteile:

Hohe Integrationsdichte

Geringe Verlustleistung

Einfacher Fertigungsprozeß

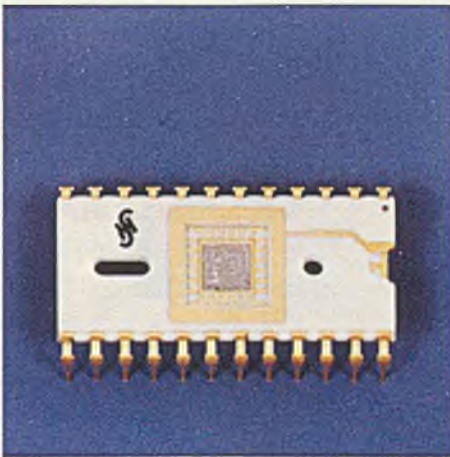
Niedrige Herstellungskosten

Nachteile:

Mäßige Arbeitsgeschwindigkeit

Geringe Ausgangsleistung

Nicht für Analogfunktionen geeignet

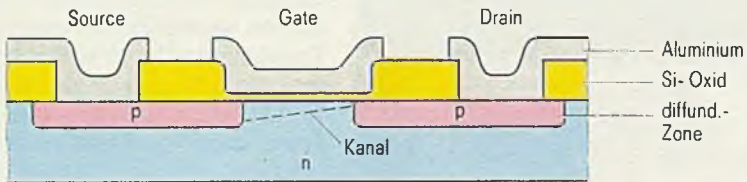


MOS-LSI-Baustein in einem Keramikgehäuse mit 24 Anschlüssen. Plastikgehäuse bis zu 28 Anschlüssen und Keramikgehäuse bis zu 40 Anschlüssen sind üblich.

MNOS-Technologie für elektrisch unprogrammierbare Festwertspeicher (PROMs). Verwendung einer Si-Nitrid-Schicht über einem entsprechend dünneren Gateoxid. Beim Programmieren werden in den adressierten Transistoren durch einen Spannungsimpuls Ladungen an der Grenzfläche Nitrid/Oxid angelagert, die diese Transistoren permanent leitend machen. Die Ladungen können durch einen Impuls umgekehrter Polarität wieder abgebaut werden.

p-MOS mit Aluminium-Gates

p-MOS ist die ursprüngliche MOS-Technik, von der mehrere verbesserte MOS-Techniken abgeleitet sind. p-MOS-Transistoren besitzen einen p-leitenden Kanal.



p-MOS mit Aluminium-Gates (Standard-p-MOS-Prozeß)

Ursprünglicher, am weitesten verbreiteter MOS-Prozeß.

(Arbeitsweise des Transistors s. Seite 34).

Die Gate- und Drain-Spannung muß relativ hoch sein („Hochvolttechnik“)

Vorwiegend Anreicherungstyp

Vorteile:

Einfachster MOS-Prozeß
Niedrigste Herstellungskosten
Hohe Störsicherheit

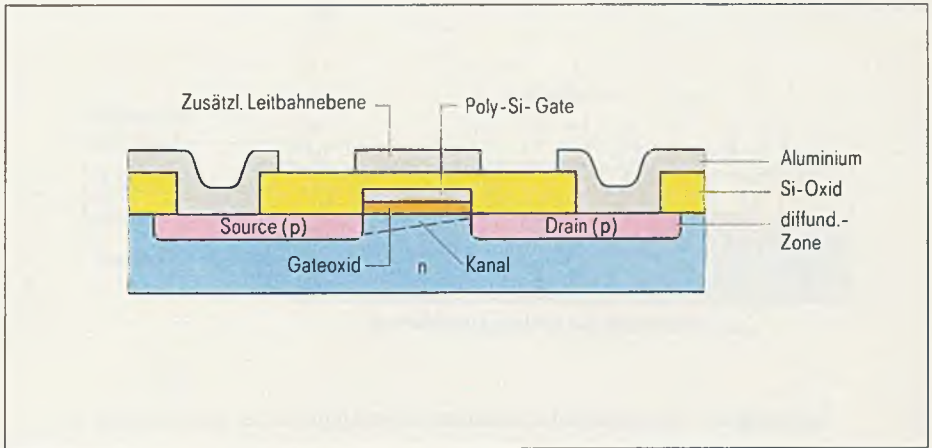
Nachteile:

Zwei hohe Versorgungsspannungen
(-27 V und -12 V)
Geringe Arbeitsgeschwindigkeit
(100 ns/Stufe)
Relativ hohe Verlustleistung
(0.5 mW/Gatter)
TTL-Anpassung aufwendig

Anwendung:

Kundenspezifische MSI- und LSI-Schaltungen.

p-MOS mit Silizium-Gates



p-MOS mit Silizium-Gates

Die Gate-Elektrode und die angeschlossene Verdrahtung bestehen aus leitfähigem polykristallinem Silizium. Eine Siliziumoxidschicht über dieser Verdrahtungsebene ermöglicht eine zusätzliche Ebene für elektrische Leitbahnen.

(Arbeitsweise des Transistors s. Seite 34).

Vorwiegend Anreicherungstyp

Vorteile*:

Höhere Integrationsdichte
(Faktor 1.3)

Höhere Arbeitsgeschwindigkeit
(70 ns/Stufe)

Geringere Verlustleistung
(Faktor 0.7)

Nachteile*:

Komplizierterer Fertigungsprozeß
Geringere Störsicherheit

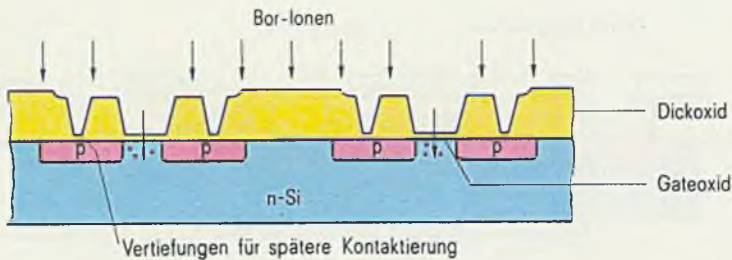
Anwendung:

Datenspeicher-Bausteine

* Im Vergleich zu Standard-p-MOS

p-MOS mit Verarmungs- und Anreicherungs-Transistoren

Verbesserte elektrische Eigenschaften durch Absenkung der Schwellenspannung und Erzeugung von Verarmungs-Transistoren mit Ionen-Implantation.



1. Implantation: Absenkung der Schwellenspannung

Die **Implantation** erfolgt in zwei Schritten:

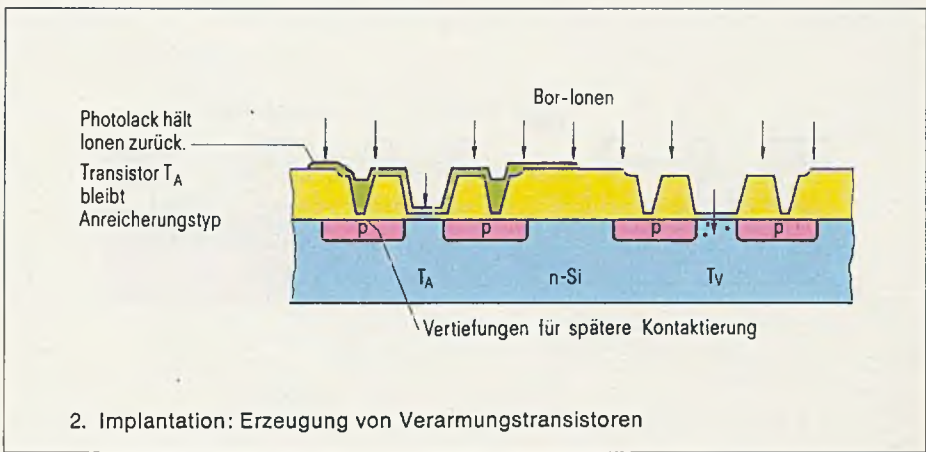
1. Absenkung der Schwellenspannung aller Transistoren (typ. von -4 V auf $-1,5\text{ V}$)

Nach Fertigstellung der p-Kanal-Transistoren in Standard-p-MOS-Technik werden in den Kanalzonen der Transistoren Akzeptor-Ionen (Bor-Ionen) implantiert. Die Maskierung hierzu erfolgt durch die Dicke des Oxids. Die Bor-Ionen können das Dickoxid nicht durchdringen, wohl aber das dünne Gateoxid der Transistoren.

2. Erzeugung von Verarmungs-Transistoren (T_V) durch einen weiteren Implantationsschritt.

Umwandlung eines Teils der Transistoren vom Anreicherungs- zum Verarmungstyp. Ionenimplantation findet nur unter nichtbelacktem Gate-Oxid statt. Transistor T_V wird dadurch ein zweites Mal dotiert und zum Verarmungstyp umgewandelt.

Die Verarmungstransistoren bilden meistens die Lastelemente in den einzelnen Stufen der Schaltung („depletion-load“-Technik).



Vorteile*:

- geringere Verlustleistung (Faktor 0.2)
- höhere Arbeitsgeschwindigkeit (50 ns/Stufe)
- höhere Integrationsdichte (Faktor 1.3)
- TTL-Kompatibilität
- Niedrige, unkritische Versorgungsspannungen

Nachteil*:

- Zusätzliche Fertigungsschritte

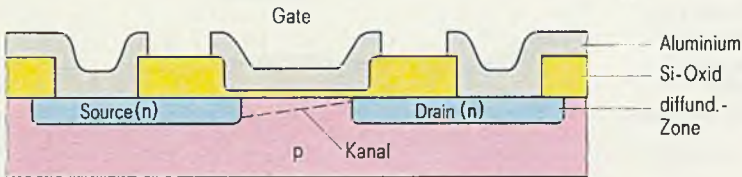
Anwendung:

- Standard- und kundenspezifische Logikschaltungen, Speicher, Mikroprozessoren

* Im Vergleich zu Standard-p-MOS

n-MOS mit Aluminium-Gates

n-MOS ist eine verbesserte MOS-Technik mit n-leitendem Kanal zur Erzielung niedriger Schwellenspannungen und hoher Schaltgeschwindigkeit



n-MOS mit Aluminium-Gates

Wie der Standard-p-MOS-Prozeß (s. Seite 52), jedoch ausgehend von einem

p-dotierten Substrat mit n-dotierten Diffusionszonen

Durch die höhere Beweglichkeit der Elektronen gegenüber Löchern im Siliziumkristall (Faktor 3) ergibt sich für n-MOS eine entsprechend höhere Schaltgeschwindigkeit gegenüber p-MOS.

Vorwiegend Verarmungstyp

* Im Vergleich zu Standard-p-MOS

Vorteile:

Höhere Arbeitsgeschwindigkeit, 30 ns/Stufe

Höhere Integrationsdichte, Faktor 1.3*

Nur eine Versorgungsspannung, 5 Volt

Geringe Verlustleistung, Faktor 0.2*

Voll TTL-kompatibel

Nachteil:

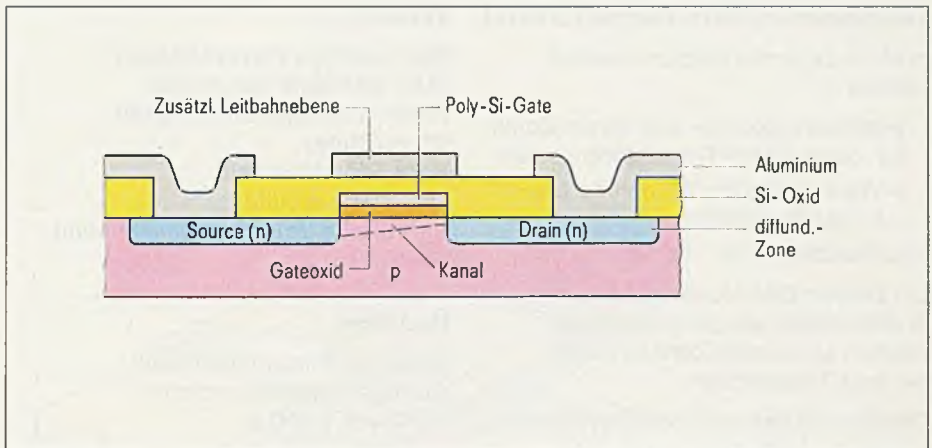
Kritischer Fertigungsprozeß

Anwendung:

Schnelle Standardbausteine (Speicher, Rechner)

n-MOS mit Silizium-Gates

COMO



n-MOS mit Silizium-Gates

Wie p-MOS mit Silizium-Gates (S. 53), jedoch ausgehend von einem

p-dotierten Substrat mit n-dotierten Diffusionszonen

Vorwiegend Verarmungstyp

Vorteile:

- Sehr hohe Arbeitsgeschwindigkeit, 20 ns/Stufe
- Sehr hohe Integrationsdichte, Faktor 1.5*
- Nur eine Versorgungsspannung, 5 Volt
- Geringe Verlustleistung, Faktor 0.2*
- Voll TTL-kompatibel

Nachteil:

Kritischer Fertigungsprozeß

Anwendung:

Schnelle Standardbausteine (Speicher, Rechner)

* Im Vergleich zu Standard-p-MOS

C-MOS

(Komplementäre MOS-Technik)

C-MOS-Schaltungen enthalten sowohl p-Kanal- als auch n-Kanal-MOS-Transistoren.

Komplementäre MOS-Technik (C-MOS)

In ein n-dotiertes Siliziumsubstrat werden

p-leitende Source- und Drain-Zonen für die p-Kanal-Transistoren sowie p-Wannen für die Aufnahme der n-Kanal-Transistoren

eindiffundiert.

Ein zweiter Diffusionsprozeß erzeugt in den p-Wannen die n-leitenden Source- und Drain-Zonen für die n-Kanal-Transistoren.

Darüber hinaus sind noch Isolationszonen zur Vermeidung von Leckströmen in der Schaltung enthalten.

Da in Komplementärstufen immer einer der beiden Transistoren (T_p oder T_n) abgeschaltet ist, kann kein Gleichstrom von der Versorgungsspannung zum Substrat fließen.

Die statische Verlustleistung von C-MOS-Schaltungen ist deshalb äußerst gering.

Mit zunehmender Frequenz steigt die Leistungsaufnahme wegen des Umladestroms für die parasitären Kapazitäten an.

Vorteile:

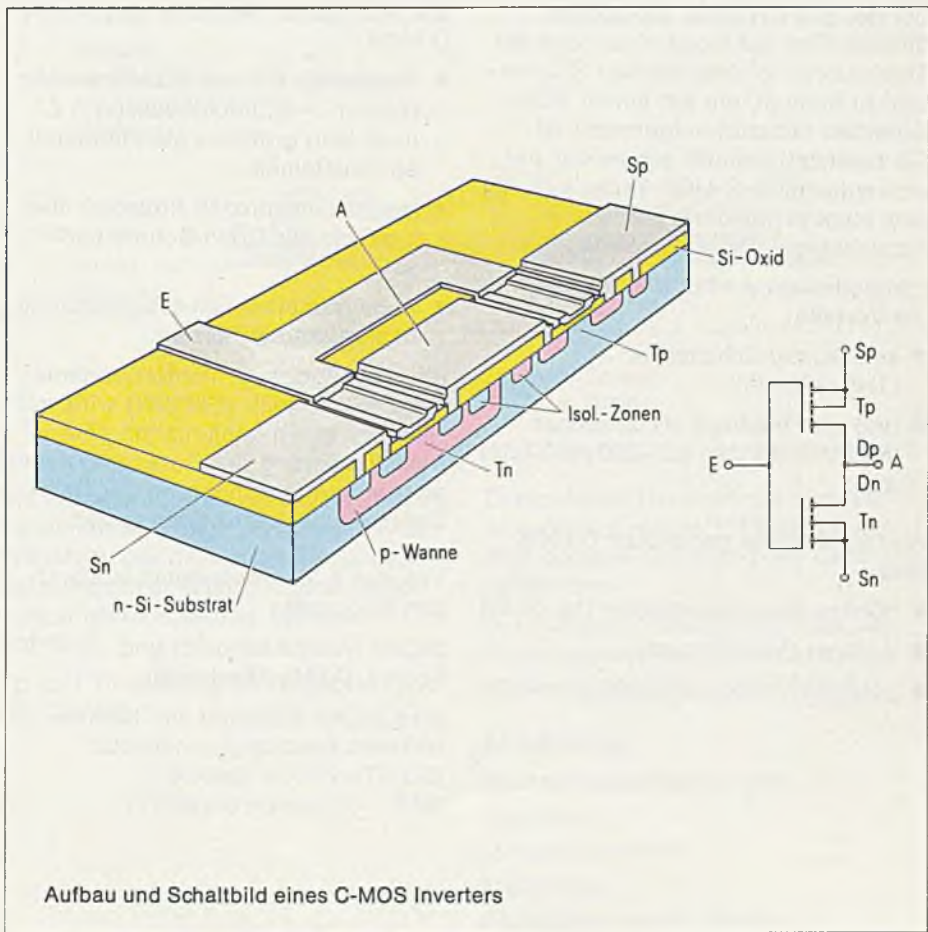
Sehr niedrige Verlustleistung (0,01 mW/Stufe bei 1 kHz)
Hohe Arbeitsgeschwindigkeit (20 ns/Stufe)
Hohe Störsicherheit
TTL-Kompatibilität
Unkritische Versorgungsspannung (3–16 V)

Nachteile:

Kritischer Fertigungsprozeß
Geringe Integrationsdichte (50% von p-MOS)

Anwendung:

Rechner- und Uhren-LSI-Bausteine
Standard-MSI-Schaltungen
Batteriebetriebene Geräte



ESFI-Technik

ist eine neuartige Technik für komplementäre MOS-Schaltungen, die als Substrat an Stelle einer Siliziumscheibe eine Scheibe aus einem mit Silizium beschichteten nichtleitenden Kristall verwendet

Bei der ESFI-Technik (**E**pitaxialer **S**ilizium-Film auf **I**solator) werden die Transistoren in einer dünnen Siliziumschicht erzeugt, die auf einem nichtleitenden Substrat aufgebracht ist. Sie besitzen deshalb gegenüber der konventionellen C-MOS-Technik (S. 58) eine stark verminderte parasitäre Kapazität und verbesserte Isolation.

Infolgedessen weisen die Transistoren die **Vorteile**

- sehr kurzer Schaltzeiten (1–5 ns/Stufe)
- und sehr niedriger dynamischer Verlustleistungen (50–200 μ W/Stufe) auf.

Weitere Vorteile gegenüber C-MOS sind

- höhere integrationsdichte (ca. 20%)
- weniger Prozeßschritte
- hohe Strahlungs-Unempfindlichkeit.

Die wichtigsten **Nachteile** gegenüber C-MOS:

- Wesentlich höhere Substratkosten (Faktor > 4), infolgedessen z. Z. noch kein größeres Marktangebot an Bausteinen
- Herstellungsprozeß kritischer hinsichtlich der Drain-Source-Leckströme
- Substratmaterialien schwieriger zu bearbeiten als Silizium.

Bei einer fortgeschrittenen Variante der ESFI-Technik (**ESFION**) wird mit Hilfe der Ionen-Implantation eine Selbstjustierung der Gates und damit eine weitere Verringerung der Gate-Überlappungskapazitäten erzielt.

Von den z. Z. verwendeten isolierenden Substraten

Saphir (Aluminiumoxid) und Spinell (Al-Mg-Mischoxid)

wird Saphir aufgrund von Kostenvorteilen bevorzugt eingesetzt (SOS-Technik, s. Seite 61.
SOS = Silicon on Sapphire)

Ladungsgekoppelte Schaltungen (CCD)

sind Halbleiterschaltungen ähnlich der MOS-Technologie, deren Arbeitsweise auf dem schrittweisen Transport von elektrischen Ladungen unter der Kristalloberfläche basiert

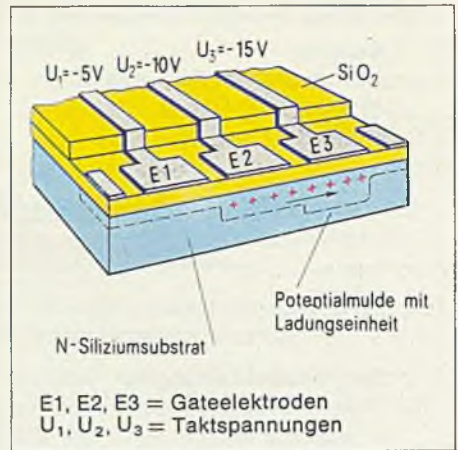
Auf der Oberfläche eines n-dotierten Siliziumsubstrats ist eine große Anzahl dicht nebeneinanderliegender, kettenförmig aufgereihter Aluminiumelektroden (Gates) isoliert angebracht (siehe Bild). Transistoren befinden sich nur jeweils am Signaleingang und -ausgang einer Kette.

Datensignale am Eingangstransistor der Kette injizieren entsprechende Ladungen in den Bereich unterhalb der ersten Gate-Elektrode.

Taktspannungen, die in geeigneter zeitlicher Reihenfolge an den Elektroden der Kette anliegen, bewegen diese Ladungen mit jedem Taktwechsel unter der Oberfläche um eine Stelle weiter in Richtung auf das Ende der Kette.

Dieser Vorgang entspricht dem Fortschreiten von Informationseinheiten in einem Schieberegister-Speicher.

Ladungsverluste, die bei jeder Signalverschiebung auftreten, werden nach einer bestimmten Länge des Registers durch MOS-Verstärkerstufen ausgeglichen.



Prinzipaufbau einer CCD-Schaltung für Dreiphasen-Takt

Unter der Elektrode mit der höchsten negativen Spannung ergibt sich für die positiven Ladungen (Informationsträger) die tiefste Potentialmulde. In diese fließen die Ladungen aus einer benachbarten flacheren Potentialmulde hinein.

Der Takt bewirkt eine schrittweise Fortbewegung der Potentialmulden und damit der Ladungen.

Anwendung:

Ersatz für Festkopf-Plattenspeicher
und Trommelspeicher

Digitalfilter

Bildspeicher für Fernsehkameras

Weiterentwicklung:

Anstelle von Dreiphasen-Systemen (aufwendige Leitungsführung, extrem geringe Elektroden-Abstände), sind bevorzugt ionenimplantierte Zweiphasen-Schaltungen in der Entwicklung. Bei diesen ist der Wirkungsgrad der Ladungsübertragung höher und der Elektrodenabstand weniger kritisch.

Nichtflüchtige CCD-Speicher werden durch eine zusätzliche Speicherung der Ladungen in Nitridschicht-Kondensatoren erzielt (MNOS-Technik).

Neben linearen CCD-Ketten können auch X-Y-Matrizen (Speicher-Flächen) gebildet werden.

Da Ladungen auch durch auftreffendes Licht an der Oberfläche des Kristalls gebildet werden können, sind entsprechende Sonderformen flächenhafter CCD-Schaltungen als Bildspeicher geeignet.

Vorteile:

Sehr hohe Integrationsdichte
(2 kbit/mm²)

Niedrigster Bitpreis aller Halbleiter-Speicher (0.3 Pf/bit)

Analoge Datenspeicherung

Hohe Arbeitsgeschwindigkeit

Nachteile:

Nur dynamische Arbeitsweise

Nicht TTL-kompatibel

Mikroprozessoren

sind monolithische Integrierte Standardschaltungen, die die zentralen Steuer- und Rechen-einheiten in Mikrocomputern bilden

Mikroprozessoren entsprechen den Zentralen Recheneinheiten (CPU) von größeren Computern.

Sie bestehen vorwiegend aus einem LSI-Baustein in MOS-Technologie.

Mit demselben Mikroprozessor können verschiedenartige Computerschaltungen aufgebaut werden, da die für diese Schaltungen identischen Steuer- und Rechen-Funktionselemente auf dem Mikroprozessor-Chip zusammengefaßt sind.

Die Daten werden im Mikroprozessor wortweise verarbeitet, d. h. in Gruppen von mehreren Bits gleichzeitig (Wortlängen von 4, 8, 12 oder 16 Bit).

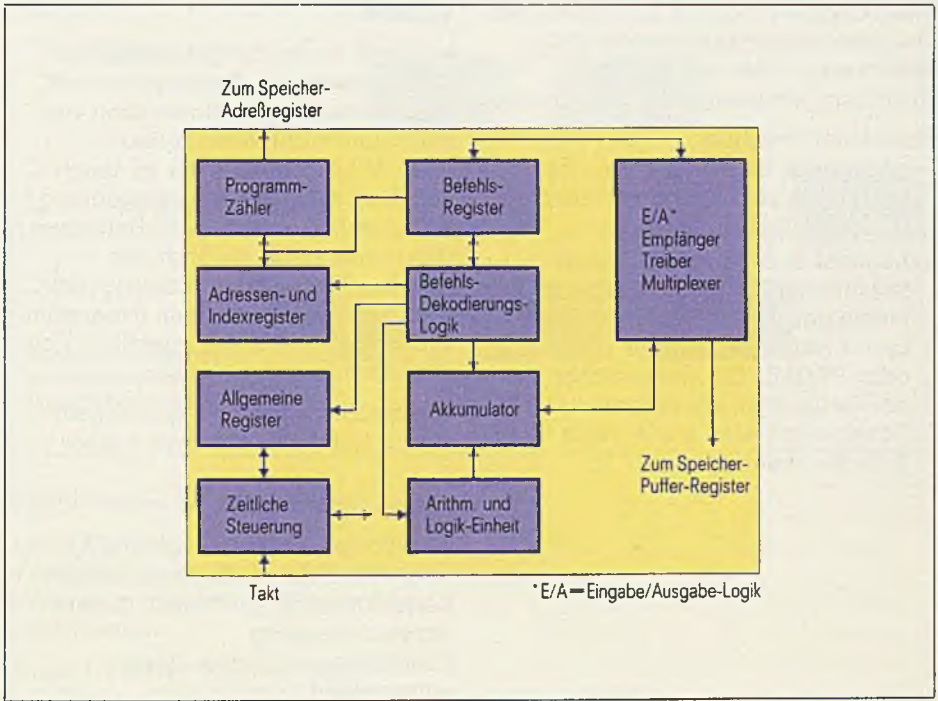
Bipolare Mikroprozessoren gewinnen wegen ihrer höheren Arbeitsgeschwindigkeit an Bedeutung, insbesondere in der Form von Prozessoren kleiner Wortlänge (2 bis 4 Bit), die sich zur Verarbeitung größerer Wortlängen modularartig zusammensetzen lassen („bit-slice“-Struktur).

Der Mikroprozessor machte den Mikrocomputer möglich (s. Seite 66).

Grundfunktionen des Mikroprozessors: Befehle (Funktionsanweisungen, Adressen und Daten) von anderen Bausteinen der Mikrocomputer-schaltung und ggf. externen Steuergeräten einholen, sie interpretieren und ausführen.

In den meisten Mikroprozessoren sind hierfür gewisse Arbeitsabläufe fest programmiert.

Die auf dem Markt befindlichen Mikroprozessoren unterscheiden sich z. T. wesentlich in ihrer inneren Struktur, der Leistungsfähigkeit und der Programmierung (der „Software“).



Die wichtigsten Funktionseinheiten eines typischen Mikroprozessors.
Alle diese Funktionseinheiten sind gewöhnlich in einen einzigen Chip integriert.

Mikrocomputer

sind programmierbare Kleinrechner-schaltungen aus LSI-Bausteinen mit einem Mikroprozessor

Mikrocomputer können die Funktionen von anwendungsspezifischen LSI-Schaltungen oder von größeren Rechnern (Minicomputern) ausführen.

Beim Mikrocomputer

- werden die Steuer- und Rechenfunktionen vom **Mikroprozessor** (s. Seite 64) ausgeführt.
- befindet sich das anwendungsspezifische Programm (Software) in einem gesonderten, programmierbaren Halbleiterspeicher (ROM oder PROM). Ein wesentlicher Teil der Gatterlogik konventioneller Schaltungen wird somit durch Speicher ersetzt.

Vorteile:

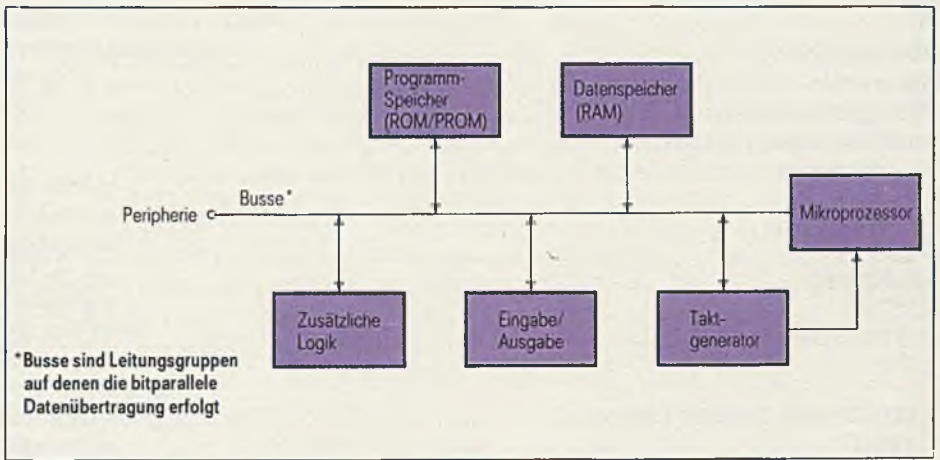
In einem anwendungsspezifischen LSI-Baustein sind Rechenwerk und Ablaufsteuerung in einem Chip vereinigt und nicht veränderbar.

Beim Mikrocomputer ist es durch das Abtrennen der Ablaufsteuerung (Programmspeicher) vom Rechenwerk (Mikroprozessor) möglich, die Schaltung mit Standardbausteinen aufzubauen und über den Programmspeicher für spezielle Funktionen zu programmieren.

Wirtschaftlichste Lösung in einem weiten Bereich von Anwendungen.

Anwendungen:

Werkzeugmaschinensteuerung
Überwachung von Lagerbeständen
Karteiüberprüfung (Polizei, Banken)
Verkehrsregelung
Nachrichtentechnische Datenaufbereitung
Automatisierung von Meßgeräten
Allgemeine Kleinrechnerfunktionen



Beispiel eines Mikrocomputers.

Jedes der dargestellten Computerelemente besteht gewöhnlich aus einer oder mehreren Integrierten Schaltungen.

Es gibt jedoch auch Mikrocomputer, bei denen alle diese Einheiten in einen einzigen Chip integriert sind (Monolithische Mikrocomputer).

Stichwortverzeichnis

	Seite
A	
Abstimm-diode	17
Akzeptoren	9, 12
Analog-Schaltungen	43
Anreicherungstyp-Transistor	35
Austrittsarbeit	17
B	
Basis	21, 25
Bipolare IS	42, 43, 44
Bor	8, 11, 27
Bus (Mikrocomputer-)	67
C	
CCD (Charge Coupled Devices)	62
C-MOS	58
D	
DCTL	45
Depletion-Transistor	35
Diac	31
Dickschicht-Technik	36
Diffundieren	11
Diffusionsspannung	12, 14
Digitalschaltungen	41, 44, 50
Dioden	14, 16, 18, 20, 22
Dioden-Kennlinie	14, 16, 18
Dioden-Transistor-Logik	45
Direct-Coupled-Transistor-Logic	45
Donatoren	9, 12
Dotierung (n, n ⁺ , p, p ⁺)	9, 10
Dotierstoffe	10, 22
Dotiertechniken	10

Drain	32, 34, 52
Dreifachdiffundierte Transistoren	29
DTL	45
Dünnschicht-Technik	37
Durchbruchspannung	16
Durchlaßrichtung	13, 14
Durchlaßspannung	22
Durchlaßstrom	13, 14

E

ECL	45
Einfachdiffundierte Transistoren	29
Einkristall	10
Elektronen	7, 9, 12
Emitter	21, 25
Emitter-Coupled-Logic	45
Emitterstrom	21, 25
Enhancement-Transistor	35
Epibasistransistoren	28
Epitaxie	27
ESFI	60

F

Feldeffekt	32, 34
Feldeffekt-Transistor	32, 34
Feldstärke	16, 18
FET	32, 34
Fotodiode	20, 23
Fotoelement	21
Fotoempfänger	20, 23
Fotolithografie	27
Fotospannung	21
Fotostrom	20, 21
Fototransistor	21, 23

G

Galliumarsenid	19, 22
Galliumphosphid	22
Gate	30, 34
Gateoxid	34, 52, 53
Germanium	6, 8, 10
Gleichrichter	14, 17
Gunn-Element	19
Großintegration	46

H

Halbleiter	6, 7, 8
Halbleiter, dotierte	8
Halbleiterkristall	7
Haltestrom (SCR)	31

Hochfelddomäne	19
Hybridschaltungen	38
I	
I ² L	48
Impattdioden	18
Implantieren	11
Indium	8, 10
Integrated Injection Logic	48
Integrierte Schaltungen	40
Ionen-Implantation	11, 54, 55
i-Zone	15, 18, 19
J	
JFET	32
Junction FET	32
K	
Kanal	32, 34
Kapazität (pn-Übergang)	17
Kapazitätsdiode	17
Kollektor	25
Kollektorstrom	25
Komplementäre MOS-Technik	58
Komplementäre Transistorpaare	48, 58
Koppelement	23
Kristallgitter	10
Kristallverstärker	24
L	
Ladungsgekoppelte Schaltungen	62
Ladungsträger	7, 9, 15, 18
Ladungsträgerpaare	14
Langsame störsichere Logik	45
Large Scale Integration	48
Lawinen-Laufzeit-Diode	18
LED	22
Legieren	10
Legierungstransistor	10
Leitfähigkeit	6
Lichtenergie	21
Löcher	9, 12, 24
Low-Power-Schottky-TTL	48
LSI	41, 46
LSL	45
Lumineszenzdiode	22, 23
M	
Mesa-Transistor	25
Mikroprozessoren	64, 66
Mikrocomputer	66

Mikrowellen-Dioden	18
Mikrowellen-Verstärker	18
Monolithische IS	40, 41, 46
MNOS	51
MOS-Feldeffekt-Transistor	34
MOS-Hochvolttechnik	34
MOS-Niedervolttechnik	34
MOS-Techniken (LSI)	50
MOS-Tetrode	34
MSI	41
N	
Negative Ladungsträger	9
n-Kanal-MOS	35, 56
n-leitende Halbleiter	9, 12
O	
Optoelektronisches Koppellement	23
Oxidation	27
P	
Periodisches System der Elemente	8
p-i-n-Gleichrichter	15
PIN-Dioden	19
p-Kanal-MOS	34
Planartechnik	26
p-leitende Halbleiter	9, 11, 12
p-MOS	52
pn-Übergang	12, 17, 22, 25
Poly-Silizium-Gate	53, 57
Potentialmulde	62
PROM	66
Q	
Quelle	32
R	
Raumladungszone	12, 13, 15, 17, 18, 20
Rekombination	22
Resistor-Transistor-Logik	45
ROM	66
RTL	45
S	
Saphir	61
Schaltzeit	14
Schaltverzögerung	14
Schichtschaltungen	36
Schottkydiode	17
Schwellenspannung	14, 35, 54
SCR	30

Senke	32
Siebdruckverfahren	36
Silicon-Controlled-Rectifier	30
Silizium	8
Silizium auf Saphir	61
Silizium-Gate-MOS-Technik	53, 57
Siliziumoxid	26, 52
Small Scale Integration	41
Software	64, 66
Solarzellen	21
SOS	61
Source	32, 34
Sperrichtung	13, 14, 25
Sperrschicht	12, 17
Sperrschicht-Feldeffekt-Transistor	32
Sperrspannung	14, 15, 16
Sperrstrom	14, 16, 20, 25, 31
Spezifischer Widerstand	6
Spinell	60
SSI	41
Störstellen (Kristallgitter)	14
Stoßionisation	16
Substrat	34, 36, 60
T	
Thyristor	30
Transistor-Transistor-Logik	44
Transistor, bipolare	24, 26
Trapatt-Dioden	18
Triac	31
TTL	44
Tunnelodiode	18
Tunnelstrom	18
U	
Unipolartransistor	32
V	
Valenzelektronen	7
Varaktoren (Speicher-)	19
Verarmungs-Typ-Transistor	35, 54
Vierschicht-Triode	30
W	
Widerstand, spezifischer	6
Wirkungsgrad (Solarzellen)	21
Z	
Zener-Diode	16
Zenereffekt	16
Zündung (SCR)	31

Zweigniederlassungen in der Bundesrepublik Deutschland und Berlin (West)

1000 Berlin 61
Schöneberger Straße 2-4
Postanschrift:
1000 Berlin 11, Postfach
Tel. 255-1, Telex 183 766

2800 Bremen 1
Contrescarpe 72
Postfach 127
Tel. 3 64-1
Telex 245 451

4600 Dortmund 1
Märkische Straße 8-14
Postfach 658
Tel. 5 48-1
Telex 8 22 312

4000 Düsseldorf 1
Lahnweg 10
Postfach 1115
Tel. 30 30-1
Telex 8 581 301

4300 Essen 1
Kruppstraße 16
Postfach 22
Tel. 20 13-1
Telex 8 57 437

6000 Frankfurt (Main) 1
Gutleutstraße 31
Postfach 4183
Tel. 2 62-1
Telex 4 14 131

2000 Hamburg 1
Lindenplatz 2
Tel. 2 82-1
Telex 2162 721

3000 Hannover 1
Am Maschpark 1
Postfach 53 29
Tel. 199-1
Telex 9 22 333

5000 Köln 1
Franz-Geuer-Str. 10
Postfach 10 16 88
Tel. 5 76-1
Telex 8 881 005

6800 Mannheim 1
N 7.18
Postfach 20 24
Tel. 2 96-1
Telex 4 62 261

8000 München 80
Richard-Strauss-Straße 76
Postanschrift:
8000 München 2
Postfach 20 21 09
Tel. 92 21-1
Telex 5 29 421

8500 Nürnberg 1
Von-der-Tann-Straße 30
Postfach 24 29
Tel. 6 54-1
Telex 6 22 251

6600 Saarbrücken 3
Martin-Luther-Straße 25
Postfach 359
Tel. 30 08-1
Telex 4 421 431

7000 Stuttgart 1
Geschwister-Scholl-Straße 24
Postfach 120
Tel. 20 76-1
Telex 7 23 941

Siemens-Landesgesellschaften und -Vertretungen

Europa

Belgien

Siemens Société Anonyme
Chaussée de Charleroi 116
B-1060 Bruxelles
Tel. 5 37 3100, Telex 21 347

Bulgarien

RUEN
Technisches Beratungsbüro
der Siemens AG
uliza Nikolai Gogol 5/
Boulevard Lenin
BG-1504 Sofia 4
Tel. 45 70 82, Telex 22 763

Dänemark

Siemens Aktieselskab
Borupvang 3
DK-2750 Ballerup
Tel. 65 65 65, Telex 35 313

Finnland

Siemens Osakeyhtiö
Mikonkatu 8
SF-00101 Helsinki 10
(PL 8)
Tel. 107 14, Telex 12 465

Frankreich

Siemens S.A.
B.P. 109
F-93203 Saint-Denis CEDEX 1
Tel. 8 20 61 20, Tx. 62 853

Griechenland

Siemens Hellas E.A.E.
Voulvis 7
Athen 125 (P.O.B. 6011)
Tel. 32 93-1, Telex 216 291

Großbritannien

Siemens Ltd.
Great West House,
Great West Road
Brentford TW8 9DG
Tel. 5 68 91 33, Telex 23 176

Irland

Siemens Ltd.
8, Raglan Road
Dublin 4
Tel. 68 47 27, Telex 5341

Island

Smith & Norland H/F
Nóatun 4,
Reykjavik (P.O.B. 519)
Tel. 3 83 20, Telex 20 55

Italien

Siemens Elettra S.p.A.
Via Vittor Pisani, 20
I-20124 Milano
(Casella Postale 4183)
Tel. 62 48, Telex 36 261

Jugoslawien

Generalexport
Masarikava 5/XV
YU-11000 Beograd
(YU-1101 Beograd
Poštanski fah 223)
Tel. 6 84-866, Telex 11 287

Luxemburg

Siemens Société Anonyme
Rue Glesener 17
Luxembourg (P.B. 1701)
Tel. 49 711-1, Telex 3430

Niederlande

Siemens Nederland N.V.
Prinses Beatrixlaan 26
Den Haag 2077
(Postbus 1068)
Tel. 78 27 82, Telex 31 373

Norwegen

Siemens A/S
Østre Aker Vei 90
N-Oslo 5
(Postboks 10, Veitvet)
Tel. 15 30 90, Telex 18 477

Österreich

Siemens Aktiengesellschaft
Österreich
A-1030 Wien,
Apostelgasse 12
(A-1031 Wien, Postfach 326)
Tel. 72 93-0, Telex 11 866

Polen

PHZ Transactor S.A.
 PL-00-950 Warszawa
 (P.O.B. 30)
 Tel. 49 72 62, Telex 813 288

Portugal

Siemens S.A.R.L.
 Av. Almirante Reis, 65
 Lisboa-1 (Apartado 1380)
 Tel. 53 88 05, Telex 12 563

Rumänien

Siemens Birou
 de consultatii tehnice
 Str. Jules Michelet 15-17
 par. abt. 5
 R-7 Bucuresti 1
 Tel. 15 18 25, Telex 11 473

Schweden

Siemens AB
 Norra Stationsgatan 63-65
 Stockholm
 (Fack, S-10435 Stockholm 23)
 Tel. 22 96 80, Telex 1880/81

Schweiz

Siemens-Albis AG
 CH-8001 Zürich
 (CH-8021 Zürich,
 Postfach 605)
 Löwenstraße 35
 Tel. 23 03 52, Telex 52 131

Spanien

Siemens S.A.
 Orense, 2
 Madrid-20 (Apartado 155)
 Tel. 4 55 25 00, Telex 27 769

Tschechoslowakei

EFEKTIM
 Vertretung ausländischer
 Gesellschaften in der CSSR
 Václavské náměstí 1
 CS-11000 Praha 1
 (P.O.B. 457)
 Tel. 25 84 17, Telex 122 389

Türkei

Simko Ticaret ve Sanayi A.S.
 Meclisi Mebusan Cad. 55/35
 Istanbul (Fındıklı)
 (P.K. 64 Tophane)
 Tel. 45 20 90, Telex 22 290

Ungarn

INTERCOOPERATION AG
 Siemens-Kooperations-
 abteilung
 Böszörményi út 9-11
 H-1126 Budapest
 (P.O.B. 1525)
 Tel. 15 49 70, Telex 224 133

**Union der Sozialistischen
Sowjetrepubliken**

Siemens Büro
 Kalantschjewskaia Str. 21/40,
 Hotel »Leningradskaja«
 Zimmer 301
 SU-Moskau
 Tel. 2 23 52 57, Telex 7413

Afrika**Ägypten**

Siemens Resident Engineers
 P.O.B. 775, Zamalek
 Cairo/Egypt
 Tel. 3 56 61, Telex 321

Algerien

Siemens Algérie S.A.R.L.
 3, Viaduc du Duc des Cars
 Alger (B.P. 224, Alger-Gare)
 Tel. 63 95 47, Telex 52 817

Äthiopien

Siemens Ethiopia Ltd.
 Ras Bitwoded Makonen
 Building
 Addis Ababa (P.O.B. 5505)
 Tel. 15 15 99, Telex 21052

Libyen

Assem Azzabi, Tariq Building
 1, September Street
 Tripoli (P.O.B. 2583)
 Tel. 4 15 34

Marokko

SETEL
 Société Electrotechnique
 et de Télécommunications S.A.
 Rue Lafuente
 Casablanca
 Tel. 26 13 82/84, Telex 21914

Südafrika

Siemens (Proprietary) Limited
 Siemens House
 Corner Wolmarans and Biccard
 Streets, Braamfontein
 Johannesburg 2000
 (P.O.B. 4583)
 Tel. 7 25 25 00, Telx 587 721

Sudan

National Electrical
 Commercial Company (NECC)
 Khartoum (P.O.B. 1202)
 Tel. 8 08 18, Telex 642

Tunesien

Sitelec S.A. Société
 d'Importation
 et de Travaux d'Electricité
 26, Avenue Farhat Hached
 Tunis
 Tel. 24 28 60, Telex 12 326

Zaire

Siemens Zaire S.P.R.L.
 1222, Avenue Tombalbaye,
 Kinshasa 1 (B.P. 9897)
 Tel. 2 26 08, Telex 377

Amerika**Argentinien**

Siemens S.A.
 Av. Presidente
 Julio A. Roca 530
 Buenos Aires
 (Casilla Correo Central 1232)
 Tel. 30 04 11, Telex 121 812

Bolivien

Sociedad Comercial
 e Industrial Hansa Ltda.
 La Paz (Cajón Postal 1402)
 Tel. 5 44 25, Telex 5261

Brasilien

Siemens S.A.
 Rua Cel. Bento Bicudo, 111
 BR-05069 Sao Paulo
 (Caixa Postal 1375),
 Sao Paulo 1, SP)
 Tel. 2 60 26 11, Telex 11-23681

Chile

Gildemeister S.A.C.
 Division Siemens
 Casilla 99-D
 Santiago de Chile
 Tel. 8 25 23, Telex sgo 392

Kanada

Siemens Canada Limited
 7300 Trans-Canada-Highway
 Pointe Claire, P.Q. H9R 1C7
 (P.O.B. 7300, Pointe Claire,
 P.Q. H9R 4R6)
 Tel. 695-7300, Telex 5 267 300

Kolumbien

Siemens S.A.
 Carrera 65, No. 11-83
 Bogotá
 (Apartado Aéreo 80150)
 Tel. 6140 77, Telex 44 750

Mexiko

Siemens S.A.
 Poniente 116, No. 590
 Mexico 15, D.F.
 (Apartado Postal 15064)
 Tel. 5 67 07 22, Telex 17 72 700

Uruguay

Conatel S.A.
 Ejido 1690
 Montevideo
 (Casilla de Correo 1371)
 Tel. 91 73 31, Telex 934

Venezuela

Siemens S.A.
 Apartado 3616
 Caracas 101
 Tel. 34 85 31, Telex 25 131

**Vereinigte Staaten
von Amerika**

Siemens Corporation
 186 Wood Avenue South
 Iselin, New Jersey 08830
 Tel. 4 94-1000
 Telex WU 84-4491, 84-4492

Asien**Afghanistan**

Siemens Afghanistan Ltd.
 Alaudin, Karte 3
 Kabul (P.O.B. 7)
 Tel. 4 14 60

Bangladesh

Siemens Bangladesh Ltd.
74, Dilkusha Commercial Area
Dacca (P.O.B. 33)
Tel. 24 43 81, Telex 824

Burma

Siemens Resident Engineer
No. 8 Attia Road
Rangoon (P.O.B. 1427)
Tel. 3 25 08, Telex 2009

Hongkong

Jebson & Co., Ltd.
Prince's Building, 23rd floor
Hong Kong (P.O.B. 97)
Tel. 5 22 5111, Telex 73221

Indien

Siemens India Ltd.
Head Office
134-A, Dr. Annie Besant Road,
Worli
Bombay 400018 (P.O.B. 6597)
Tel. 37 99 06, Telex 112 373

Indonesien

P.T. Siemens Indonesia
Kebon Sirih 4
Jakarta (P.O.B. 2469)
Tel. 5 10 51, Telex 46 222

Irak

Samhiry Bros. Co. (W.L.L.)
Abu Nawas Street
Baghdad (P.O.B. 300)
Tel. 9 00 21, Telex 2 255

Iran

Siemens Sherkate
Sahami (Khas) Kh. Takhte-Djamshid 32
Siemenshaus
Teheran 15
Tel. 61 41, Telex 212 351

Israel

Transelectio Company Ltd.
72/76 Harakevet Street
Tel Aviv (P.O.B. 2385)
Tel. 3 18 44, Telex 33 513

Japan

Nippon Siemens K.K.
Furukawa Sogo Building,
6-1, Marunouchi, 2-chome
Chiyoda-ku
Tokyo 100
{Central P.O. Box 1144
Tokyo 100-91)
Tel. 2 14 02 11, Telex 22 808

Jemen

Tihama Tractors
& Engineering Co. Ltd.
Sana'a (P.O.B. 49)
Tel. 24 62, Telex 217

Korea (Republic)

Siemens Electrical
Engineering Co., Ltd.
C.P.O. Box 3001
Seoul
Tel. 24 15 58, Telex 2329

Kuwait

Abdul Aziz M. T. Alghanim Co.
& Partners
Kuwait, Arabia (P.O.B. 3204)
Tel. 42 33 36, Telex 2 131

Libanon

Ets. F.A. Kettaneh S.A.
(Kettaneh Frères)
Rue du Port
Beyrouth (P.O.B. 110242)
Tel. 22 11 80, Telex 20 614

Malaysia

Guthrie Eng. (Malaysia) Sdn. Bhd.
Electrical & Communications
Division
17, Jalan Semangat
Petaling Jaya/Selangor
(P.O.B. 30)
Tel. 77 33 44, Telex 37 573

Pakistan

Siemens Pakistan
Engineering Co. Ltd.
ILACO House,
Abdullah Haroon Road
Karachi (P.O.B. 7158, Karachi 3)
Tel. 51 60 61, Telex 820

Philippinen

Engineering Equipment, Inc.
Machinery Division,
Siemens Department
P.O.B. 7160 Airmail Exchange Office
Manila International Airport
Tel. 85 40 11/19, Telex ECC 3695

Saudi-Arabien

E.A. Juffali & Bros.
Head Office
Jeddah (P.O.B. 1049)
Tel. 2 22 22, Telex 40 130

Singapur

Guthrie Engineering (Singapore)
Pte. Ltd.
Electrical
& Communications Division
41, Sixth Avenue,
Bukit Timah Road
Singapore 10
(P.O.B. 495, Singapore 1)
Tel. 66 25 55, Telex 21681

Syrien

Syrian Import
Export & Distribution
Co., S.A.S. SIEDCO
Port Said Street
Damas (P.O.B. 363)
Tel. 134 31/33

Taiwan

Delta Engineering Ltd.
42, Hsu Chang Street,
8th floor
Taipei (P.O.B. 58497)
Tel. 3 61 02 55, Telex 21826

Thailand

B. Grimm & Co. R.O.P.
1643/4, Petchburi Road
(Extension)
Bangkok 10 (P.O.B. 66)
Tel. 52 40 81, Telex 2614

Australien und Ozeanien**Australien**

Siemens Industries Ltd.
544 Church Street, Richmond
Melbourne, Victoria 3121
Tel. 4 29 7111, Telex 30 425

Neuseeland

Siemens Liaison Office
175 The Terrace
Wellington 1 (P.O.Box 4145,
G.P.O. Wellington)
Tel. 4 63 65, Telex 31233

SIEMENS