Aufbau und Wirkungsweise moderner Transistoren

Autor(en): **Winiger, F.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **51 (1960)**

Heft 5

PDF erstellt am: **29.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-917021

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Aufbau und Wirkungsweise moderner Transistoren

Vortrag, gehalten an der 23. Hochfrequenztagung des SEV vom 28. Oktober 1959 in Luzern,

von *F. Winiger*, Zürich

621.314.7.002.2

Nach einer kurzen Rekapitulation des grundlegenden Verhaltens des p-n-Überganges und des legierten p-n-p-Transistors sind zunächst die beiden wichtigsten Herstellungsmethoden für p-n-Übergänge und Transistoren, das Legieren und die Diffusion kurz beschrieben. Dabei wird gezeigt, dass die beiden Herstellungsmethoden von p-n-Übergängen zu stark verschiedenem Verhalten der Transistoren führen. Die Hochfrequenzeigenschaften des Transistors, und vor allem die drei wichtigsten HF-Parameter, Basiswiderstand, Kollektorkapazität und Grenzfrequenz werden im Zusammenhang mit den physikalischen und geometrischen Grössen des Transistors diskutiert und ein einfaches Ersatzschema angegeben. Die Wirkung einer nicht homogenen Verteilung des Widerstandes in der Basisschicht, wie sie bei den durch das Diffusionsverfahren hergestellten Transistoren (Drifttransistoren) auftritt, ist im besonderen Hinblick auf die Verbesserung des HF-Verhaltens behandelt. Anschliessend werden die Herstellung und die speziellen HF-Eigenschaften dreier Transistortypen, die alle mit einem Driftfeld arbeiten, beschrieben. Zum Schluss wird das Verhalten einer p-n-p-n-Struktur als Thyratrontransistor (gesteuerter Gleichrichter), mit dem bereits Ströme bis 20 A und Spannungen von 400 V geschaltet werden können, erklärt und die grundsätzliche Herstellungsart angedeutet.

Après un bref rappel du comportement de la jonction p-n et du transistor p-n-p allié, le conférencier décrit tout d'abord succinctement les deux principales méthodes de fabrication des jonctions p-n et des transistors: l'alliage et la diffusion. Il montre que les deux méthodes de fabrication de jonctions p-n donnent lieu à un comportement très différent des transistors. Il discute ensuite des propriétés en haute fréquence du transistor et surtout des trois paramètres les plus importants: la résistance de base, la capacité du collecteur et la fréquence de coupure, en relation avec les grandeurs physiques et géométriques du transistor, puis il indique un simple schéma équivalent. Il traite de l'influence d'une répartition non homogène de la résistance dans la couche de base, comme cela se présente dans les transistors fabriqués par le procédé de diffusion, principalement en ce qui concerne l'amélioration du comportement en haute fréquence. Il poursuit par la description de la fabrication et des propriétés particulières en haute fréquence de trois types de transistors, qui fonctionnent tous avec un champ de glissement. Pour terminer, il explique le comportement et le mode de fabrication d'une structure p-n-p-n de transistor thyratron (redresseur réglé), qui permet déjà de travailler avec des courants jusqu'à 20 A et des tensions de 400 V.

1. Einleitung

Als vor ca. 10 Jahren die ersten brauchbaren Flächentransistoren erhältlich waren, blieb ihre Anwendung auf kleine Niederfrequenzverstärker mit sehr geringer Leistung beschränkt. Seitdem wurde durch intensive Forschung und insbesondere durch neue technologische Verfahren ihr Anwendungsbereich bedeutend erweitert. Für die HF-Technik werden heute Transistoren mit einer Grenzfrequenz bis 500 oder sogar 1000 MHz angefertigt; in die Starkstromtechnik hat der Halbleiterverstärker durch den sog. «gesteuerten Gleichrichter», welcher die Thyratronröhre ersetzt, Eingang gefunden.

Bekanntlich besteht der Transistor aus einem Halbleiterkristall, Germanium oder Silizium, worin drei Gebiete durch zwei p-n-Übergänge getrennt und mit Zuführungsdrähten versehen sind. Je nach der Anordnung des Leitungscharakters dieser Gebiete unterscheidet man zwischen p-n-p- und n-p-n-Transistoren, die jedoch beide in gleicher Weise arbeiten. Die drei Gebiete bezeichnet man ihrer funktionellen Aufgabe entsprechend als Emitter, Basis und Kollektor.

In einem p-n-Übergang versuchen die positiv geladenen Löcher der p-Seite nach der n-Seite und die negativ geladenen Elektronen der n-Seite nach der p-Seite zu diffundieren. Dadurch verarmt in der unmittelbaren Umgebung des Überganges die p-Seite an Löchern und die n-Seite an Elektronen. Es bleiben die negativ geladenen Akzeptoren, bzw. die positiv geladenen Donatoren zurück, welche jetzt elektrisch nicht mehr kompensiert sind, so dass ein elektrisches Feld über der Junction entsteht, welches eine weitere Diffusion der Majoritätsträger (Löcher auf der p-Seite, Elektronen auf der n-Seite) verhindert. In der unmittelbaren Umgebung des Überganges verarmt also der Halbleiter an beweglichen Ladungsträgern, weshalb man dieses Übergangsgebiet Verarmungsschicht oder auch Raumladungsschicht nennt. Elektrostatisch betrachtet hat man einen Dipol vor sich, der eine Potentialdifferenz V_D über der Junction bewirkt. Die Dicke d dieser Verarmungsschicht und die Höhe des Potentials V_D werden durch die elektrischen Eigenschaften der Halbleiter bestimmt. In einem Halbleiter mit viel Akzeptoren (freien Löchern) oder Donatoren (freien Elektronen), d. h. in einem stark

gedopten (dotierten) Halbleiter mit grosser elektrischer Leitfähigkeit genügt eine dünnere Verarmungsschicht zur Aufrechterhaltung dieses Potentials der Grösse V_D und umgekehrt. Die Dicke der Verarmungsschicht ist also dem spezifischen Leitwert umgekehrt proportional. Besteht der Übergang zudem aus einer stark dotierten p-Seite und einer schwach dotierten n-Seite, erstreckt sich demnach die gesamte Verarmungsschicht auf die n-Seite. Während der p-n-Übergang die Diffusion der Majoritätsträger hemmt, werden die Minoritätsträger vom Potential V_D beschleunigt, so dass sie den Übergang ungehindert passieren.

Wird durch Anlegen einer äussern Spannung das Potential V_D vergrössert, so wird jede Diffusion unterbunden, und man misst einen nur kleinen, durch die Minoritätsträger bedingten Strom. Gleichzeitig wird die Verarmungsschicht breiter. Die gesamte Spannung über dem Kristall liegt über dieser Verarmungsschicht selbst. Künstlich erzeugte Minoritätsträger innerhalb des Einflussbereiches des Überganges werden von diesem gesammelt, wodurch der Strom erhöht wird. Gibt man eine Spannung umgekehrter Polarität an den p-n-Übergang, so dass V_D kleiner wird, steigt die Diffusion stark an, wobei ein hoher Strom fliesst. Der p-n-Übergang wirkt also als Gleichrichter mit der bekannten exponentiellen Charakteristik [1] [1]):

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{kT} V\right) - 1 \right] \qquad (1)$$

- k Boltzmannsche Konstante
- q Ladung des Elektrons
- T Temperatur in °K
- I_0 durch die Minoritätsträger bedingter Sättigungsstrom
- V Spannung über dem Übergang
- I Strom durch den Übergang

Es werden dabei Löcher von der p-Seite in die n-Seite injiziert und umgekehrt, wobei unter der Voraussetzung eines bedeutend stärker dotierten p-Gebietes praktisch der ganze Strom durch die Löcher getragen wird. Die injizierten Löcher bewegen sich zunächst durch Diffusion ins n-Gebiet, bis ihre Konzentration zufolge der Rekombination wieder abgebaut wird. Der Konzentrationsverlauf gehorcht einer e-Funktion, wobei man mit L_p, der Diffusionslänge, die Strecke bezeichnet, innerhalb welcher die Konzentration auf den e-ten Teil abgefallen ist. Die Diffusionslänge ist proportional der Wurzel aus dem Produkt von Diffusionskonstante und mittlerer Lebensdauer, zweier charakteristischer Grössen des verwendeten Halbleitermaterials. Folgt in der n-Region innerhalb der Diffusionslänge ein weiterer p-n-Übergang, der in der Sperrichtung vorgespannt ist, werden diese injizierten Löcher von ihm gesammelt und sein Stromfluss erhöht.

Fig. 1 zeigt schematisch eine solche p-n-p-Struktur, die Konzentration der Akzeptoren, bzw. Donatoren sowie den Potentialverlauf bei positiv vorgespanntem Emitter- und negativ vorgespanntem Kollektorübergang. Bemerkenswert ist, dass bei dieser angenommenen Verteilung von N_A—N_D die gesamten Spannungsabfälle über der Verarmungsschicht der Übergänge selbst entstehen, dass also in der Basis keine Potentialdifferenz auftritt. Die Spannung V_e zur Aufrechterhaltung des Stromes I_E am Emitterübergang ist nur klein, während die Spannung V_c über dem Kollektorübergang gross gewählt werden kann. Bei kleinerer Basisbreite w und geringer Rekombination fliesst aber im hochohmigen Kollektorkreis praktisch derselbe Strom, oder es entsteht über einem äussern Belastungswiderstand ein Spannungsabfall, der ein Mehrfaches von V_e beträgt, womit diese p-n-p-Struktur tatsächlich als Verstärker wirkt.

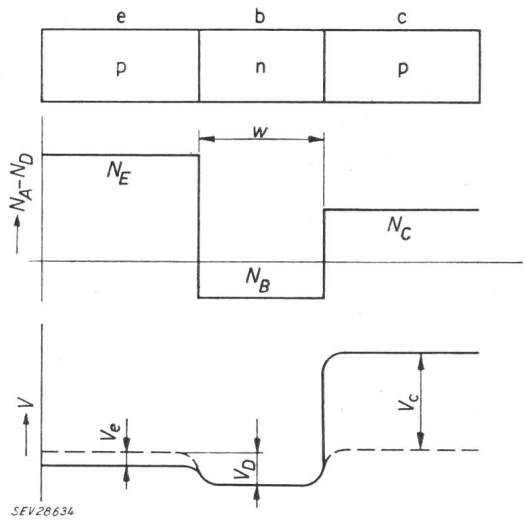

Fig. 1
Konzentrations- und Potentialverlauf in einem p-n-p-Transistor
e Emitter; b Basis; c Kollektor
N_A Konzentration der Akzeptoren; N_D Konzentration der Donatoren; N_E Akzeptorenkonzentration im Emitter; N_B Donatorenkonzentration in der Basis; N_C Akzeptorenkonzentration im Kollektor; V Potential; V_D Diffusionspotential des Überganges; V_e Potential zwischen Emitter und Basis; V_c Potential zwischen Kollektor und Basis; w Basisbreite

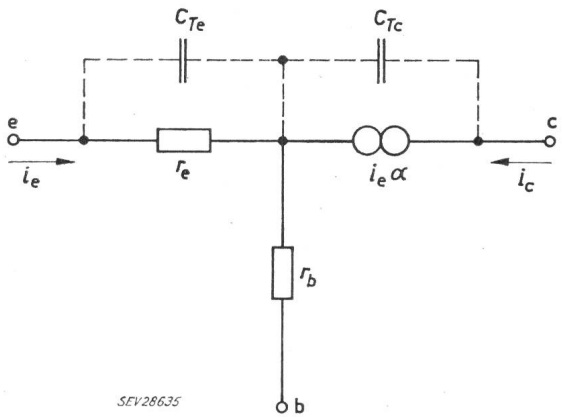

Fig. 2
Ersatzschaltbild des Transistors
e Emitter; b Basis; c Kollektor
i_e Emitterwechselstrom; i_c Kollektorwechselstrom; r_e Emitterwiderstand; r_b Basiswiderstand; C_{Te} Emittersperrschichtkapazität; C_{Tc} Kollektorsperrschichtkapazität; α Kurzschlussstromverstärkung

Für die den Gleichströmen überlagerten Wechselströme kleiner Amplitude erhält man ein Ersatzbild, wie es Fig. 2 zeigt [2; 3]. Der Emitterwiderstand r_e ist der differentielle Widerstand eines p-n-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Überganges in der Durchlassrichtung und hat den Wert:

$$r_e = \frac{kT}{q} \cdot \frac{1}{I_E} \approx \frac{25}{I_E\,[\mathrm{mA}]} \qquad (2)$$

worin I_E den eingestellten Emitterstrom bedeutet. r_b ist der Ohmsche Widerstand der sehr dünnen Basisschicht und die Kurzschlußstromverstärkung α gibt die Kollektorstromänderung für eine Emitterstromänderung an.

Technologisch betrachtet bedeutet die Herstellung von Transistoren die Fertigung von p-n-Übergängen. Man muss also in einem Halbleiter Donatoren, bzw. Akzeptoren erzeugen. Als Akzeptoren wirken die Elemente der 3. Gruppe des periodischen Systems: Bor, Aluminium, Gallium, Indium; als Donatoren diejenigen der 5. Gruppe: Phosphor, Arsen, Antimon, Wismut. Erhitzt man auf einem kleinen Plättchen aus einkristallinem n-Germanium, d. h. Germanium, dem bei der Aufbereitung eine sehr geringe Menge eines der Donatorenelemente beigegeben wurde, ein Kügelchen aus Indium, löst sich im geschmolzenen Indium eine bestimmte Menge von Germanium, so dass das Indium in das Germanium eindringt. Beim nachfolgenden Abkühlen kristallisiert ein Teil des Germaniums wieder aus und wird dadurch zu p-Germanium, weil eine bestimmte Menge Indium gelöst bleibt. An der vordersten Kante des ursprünglich geschmolzenen Materials entsteht ein p-n-Übergang, wobei die Konzentrationsänderung $N_A - N_D$ sprunghaft erfolgt, wie es in Fig. 1 dargestellt ist. Wiederholt man diesen Legierungsvorgang auf der anderen Seite des Germaniumplättchens, kommt man auf die gewünschte p-n-p-Struktur [4]. Fig. 3 zeigt schematisch einen nach diesem Legierungsprozess hergestellten Transistor.

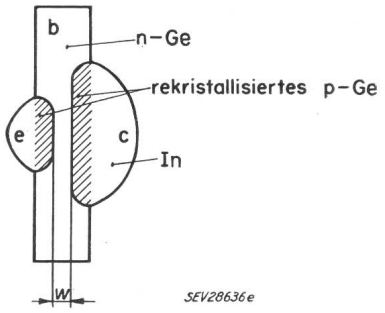

Fig. 3
Legierter p-n-p-Transistor
e Emitter; b Basis; c Kollektor
w Basisbreite; In Indium; Ge Germanium

Es ist leicht einzusehen, dass der Abstand w bei dieser Methode nicht beliebig klein gemacht werden kann, da die Eindringtiefe zu wenig reproduzierbar ist und die Junctions immer gewisse Unebenheiten aufweisen. Als äusserster Wert können im Mittel 5...10 μm erreicht werden.

Eine weitere Methode zur Herstellung von p-n-Übergängen ist die Diffusion in feste Stoffe [5; 6]. Wird beispielsweise ein Stück p-Germanium in einer arsenhaltigen Atmosphäre erhitzt, diffundieren Arsenatome in das Germanium und erzeugen Donatoren. Dabei ist die Konzentration N_0 an der Oberfläche am grössten und nimmt gegen das Innere hin ab. Beträgt die ursprüngliche Akzeptorenkonzentration N_A, so entsteht in der Tiefe x_0 von der Oberfläche ein p-n-Übergang, bei dem die Differenz $N_A - N_D = 0$ ist. Für $x < x_0$ ist $N_D > N_A$, so dass in diesem Bereich das ursprüngliche p-Material in n-Material umgeformt wurde. Ausser durch eine die gewünschten Verunreinigungen enthaltende Atmosphäre kann auch aus festen Stoffen auf der Oberfläche oder aus einer die Verunreinigung enthaltenden Schmelze diffundiert werden. Die Diffusion ist ein langsamer Prozess, der bedeutend besser als ein Legiervorgang kontrolliert werden kann. Die Eindringgeschwindigkeit ist von der Diffusionskonstante des betreffenden Elementes im Halbleitermaterial abhängig und zudem eine Funktion der Temperatur. In Fig. 4 ist die Entstehung eines p-n-Überganges bei der Diffusion aus einer Phase mit konstanter Oberflächenkonzentration N_0 dargestellt. Mit dieser Diffusionstechnik ist es daher möglich, reproduzierbare Werte der Basisbreite von 1 μm und sogar weniger zu erreichen.

Kennt man ein Akzeptor- und ein Donatorelement mit stark verschiedenen Diffusionskonstanten, ist es möglich, beide gleichzeitig zu diffundieren, so dass man bei geeigneter Wahl der Randbedingungen eine p-n-p- oder n-p-n-Struktur erhält. Durch die Kombination von Legierungs- und Diffusionstechnik werden eine Menge von Herstellungsprozessen für p-n-Junctions und auch für Transistoren möglich.

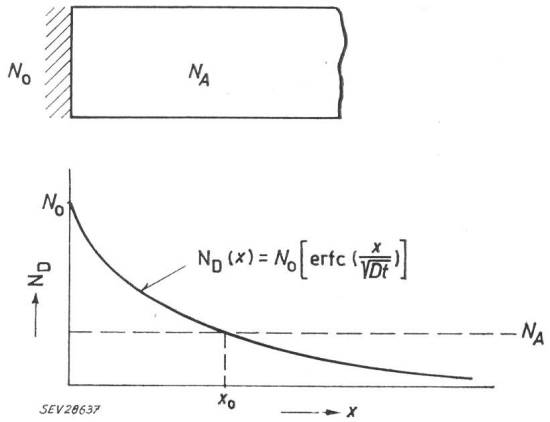

Fig. 4
Diffundierter p-n-Übergang
N_A Akzeptorenkonzentration im Halbleiterkristall; N_0 Donatorenkonzentration an der Oberfläche des Halbleiters; $N_D(x)$ Donatorenkonzentration im Kristall; x Entfernung von der Oberfläche (Tiefe); x_0 Tiefe des entstandenen p-n-Überganges; D Diffusionskonstante; t Zeit

2. Hochfrequenzeigenschaften der Transistoren

Es sind vor allem drei Parameter, die das Verhalten des Transistors bei hohen Frequenzen charakterisieren, nämlich:

a) Raumladungskapazitäten;
b) Frequenzabhängigkeit der Kurzschlussstromverstärkung;
c) Grösse des Basiszuleitungswiderstandes r_b.

Man kann einen Gütefaktor angeben, der diese drei Grössen enthält [3; 7]:

$$G = \frac{f_{c\alpha}}{25\, r_b\, C_c} \qquad (3)$$

C_c ist die Kapazität des Kollektorüberganges, $f_{c\alpha}$ die Frequenz, bei der die Stromverstärkung α auf den $\sqrt{2}$-ten Teil gefallen ist und r_b der bekannte Basiswiderstand. Die Raumladungskapazität eines p-n-Überganges ist indirekt proportional der Dicke der Verarmungsschicht. Die Verarmungsschicht wird umso breiter, je höher die Potentialdifferenz über der Schicht und je höher der spezifische Widerstand des Halbleitermaterials ist. Emitterseitig hat man nur kleine Potentialdifferenzen der Grössenordnung V_D, so dass die Emittersperrschichtkapazität C_{Te} relativ gross wird. Ein Teil des Emitterstromes fliesst direkt über C_{Te} nach der Basis und geht für den Löchertransport nach dem Kollektor verloren, so dass mit steigender Frequenz α kleiner werden muss. Bei den legierten Transistoren überwiegt jedoch die sog. Diffusionskapazität (siehe unten), so dass diese Raumladungskapazität C_{Te} vernachlässigt werden darf. Bei neuen Hochfrequenztransistoren mit sehr kleiner Basisbreite kann sie jedoch das Frequenzverhalten wesentlich beeinflussen. Der in der Sperrichtung vorgespannte Kollektorübergang weist eine höhere Potentialdifferenz auf, so dass C_{Tc} wohl kleiner wird, sich jedoch im hochohmigen Kollektorkreis stärker auswirkt.

Kleine Raumladungskapazitäten erreicht man — ausser durch hochohmiges Material — vor allem durch sehr kleine Junctionsflächen.

Am stärksten wird das Frequenzverhalten durch die endliche Laufzeit (transit time) der Löcher durch die Basis beeinflusst, indem dadurch der Wert von α bei hohen Frequenzen abnimmt. Die Grenzfrequenz $f_{c\alpha}$ nimmt mit dem Quadrat der Basisbreite ab. Für einen Transistor mit homogener Basisschicht findet man aus der Lösung der Diffusionsgleichung in erster Näherung:

$$f_{c\alpha} = \frac{D_p}{\pi w^2} \tag{4}$$

Dabei bedeutet D_p die Diffusionskonstante der Minoritätsträger in der Basis. Fig. 5 zeigt diesen Verlauf für p-n-p- bzw. n-p-n-Germanium- und Silizium-Transistoren. Unter den gleichen Vernachlässigungen kann man für den Frequenzverlauf schreiben (α_0-Wert bei kleinen Frequenzen):

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \mathrm{j} f / f_{c\alpha}} \tag{5}$$

d. h., dass α den gleichen Charakter hat wie ein RC-Netzwerk.

Eine genaue Analyse zeigt, dass die tatsächliche Grenzfrequenz grösser ist, als es Gl. (4) angibt, und dass vor allem die RC-Netzwerk-Charakteristik wegen der grösseren Phasendrehung nicht erfüllt ist. Bei sehr kleinem Wert der Basisbreite w kann sich auch die Laufzeit in der Verarmungsschicht bemerkbar machen, insbesondere bei einem Transistor mit nicht homogener Basis, die in der Nähe des Kollektorüberganges einer kleinen Raumladungskapazität wegen nur schwach dotiert ist.

Mit einer nicht homogenen Basisschicht lässt sich das Hochfrequenzverhalten eines Transistors bedeutend verbessern. Nimmt man an, die Konzentration der Donatoren in der Basis nehme vom Emitter bis zum Kollektor exponentiell ab, so kann man zeigen, dass ein elektrisches Feld im Basisraum entsteht, welches eine Diffusion der Elektronen verhindert, jedoch emitterseitig injizierte Löcher beschleunigt. Diese Beschleunigung hat eine Verkürzung der Laufzeit zur Folge, so dass bei gleicher Basisbreite eine höhere Grenzfrequenz resultiert. Für die genannte exponentielle Konzentrationsverteilung mit N_0 Donatoren am Emitter- und N_1 Donatoren am Kollektorübergang (Fig. 6) ergibt sich ein Driftpotential:

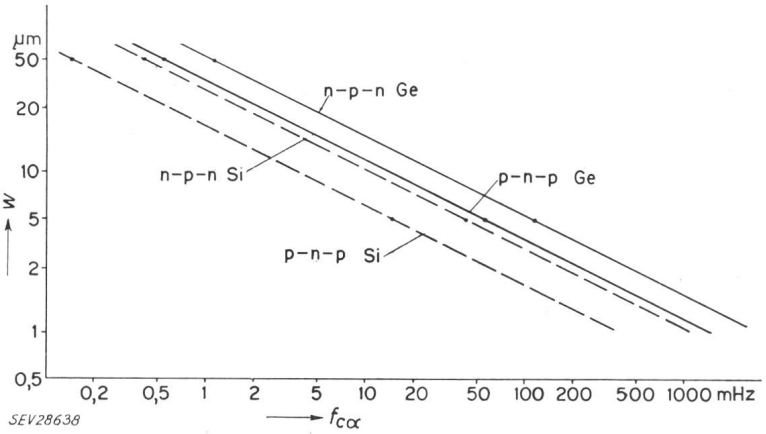

Fig. 5
Grenzfrequenz als Funktion der Basisbreite für legierte Transistoren
$f_{c\alpha}$ Grenzfrequenz; w Basisbreite

$$\Delta V = \frac{k\,T}{q} \ln \left(\frac{N_0}{N_1}\right) \tag{6}$$

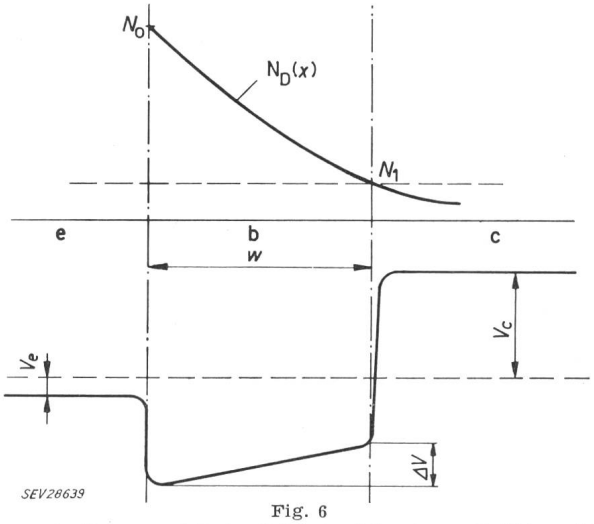

Fig. 6
Konzentrations- und Potentialverlauf in einem Drifttransistor
e Emitter; b Basis; c Kollektor
N_0 Donatorenkonzentration am Emitter; N_1 Donatorenkonzentration am Kollektor; N_D (x) Donatorenkonzentration in der Basis; V_e Emitterpotential; V_c Kollektorpotential; ΔV Driftpotential; w Basisbreite

Die Grenzfrequenz eines Transistors mit der Basisbreite w ist in Funktion von N_0/N_1 in Fig. 7 gezeigt. Der Drifttransistor hat noch weitere Vorteile: Da an der Emitterseite eine hohe Donatorenkonzentration herrscht, wird der Wert von r_b klein, während die Kollektorsperrschichtkapazität klein bleibt, da am Kollektorübergang auch die Donatorenkonzentration nur gering ist.

Durch das beschriebene Diffusionsverfahren erhält man Schichten mit abnehmender Verunreinigungskonzentration, die jedoch nicht exponentiell sind, sondern nach dem Komplement der Fehlerfunktion (erfc) verlaufen. Die Zunahme der Grenzfrequenz für diese Verteilung ist in Fig. 7 ebenfalls dargestellt. Durch das Driftfeld weicht der α-Verlauf vom RC-Charakter noch mehr ab, indem die Phasendrehung noch stärker zunimmt.

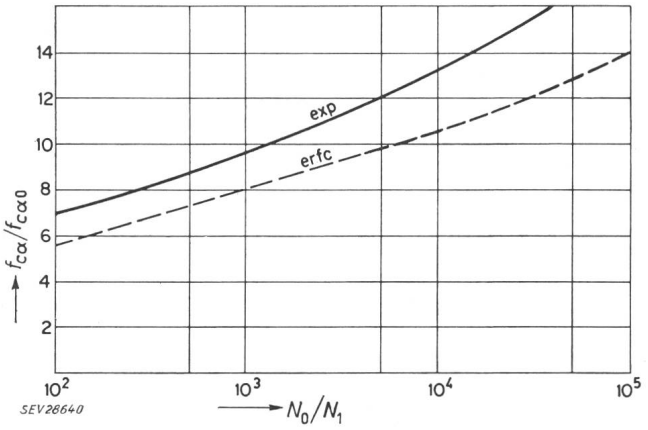

Fig. 7
Grenzfrequenz von Drifttransistoren
$f_{c\alpha}$ Grenzfrequenz; $f_{c\alpha 0}$ Grenzfrequenz eines Transistors gleicher Basisbreite ohne Driftfeld; N_0 Donatorenkonzentration am Emitter; N_1 Donatorenkonzentration am Kollektor

In der Schaltungstechnik werden die Transistoren meist nicht mit dem Emitter, sondern mit der Basis als Eingangselektrode betrieben. Die konsequente Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze ergibt eine neue Stromverstärkung zwischen Basis und Kollektor:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \tag{7}$$

Da $\alpha \approx 1$ ist, wird β sehr gross. Auch die Grenzfrequenz von β, $f_{c\beta}$ wird verändert:

$$f_{c\beta} = K f_{c\alpha} (1 - \alpha_0) \tag{8}$$

Der Faktor K ist in erster Näherung für Transistoren mit homogener Basis gleich 1. Eine genaue Analyse führt auf Werte von ca. 1,22; bei den Drifttransistoren wird er noch grösser [10]. Der Frequenzgang von β kann im Bereich bis etwa 0,1 $f_{c\alpha}$ (d. h. bis über $f_{c\beta}$) auch bei Drifttransistoren mit sehr guter Genauigkeit durch ein RC-Netzwerk angenähert werden [10].

Man kann demnach für dieses Frequenzgebiet und die Emitterschaltung ein einfaches elektrisches Ersatzschaltbild angeben, wie es Fig. 8 zeigt. Anstelle des frequenzabhängigen α-Wertes tritt die Kapazität $C_{b'e}$ zwischen den internen Basispunkt b' und den Emitter. $C_{b'e}$ setzt sich aus der Sperrschichtkapazität C_{Te} und der dominierenden Diffusionskapazität C_d zusammen, wobei für den gewöhnlichen legierten Transistor wieder eine einfache Beziehung zwischen der Diffusionskapazität und der Basisbreite angegeben werden kann:

$$C_d = \frac{q}{k\,T} \cdot \frac{w^2}{2\,D_p}\, I_E \tag{9}$$

Solange C_{Te} gegen C_d vernachlässigt werden darf, ist die Grenzfrequenz von I_E unabhängig, da $r_{b'e} = r_e / (1 - \alpha_0)$ dem Emitterstrom umgekehrt proportional ist. Die Kapazität $C_{b'c}$ ist die bereits erwähnte Raumladungskapazität des Kollektorüberganges. Bei sehr kleiner Basisbreite, und insbesondere bei Drifttransistoren, gelten diese einfachen Beziehungen nicht mehr. Vor allem ist das Ersatzschaltbild durch die Zuführungswiderstände $r_{cc'}$ und $r_{ee'}$ an Kollektor und Emitter zu ergänzen.

Der Wert von C_d wird durch das Driftfeld ebenfalls beeinflusst, jedoch nicht in gleichem Masse wie die Grenzfrequenz.

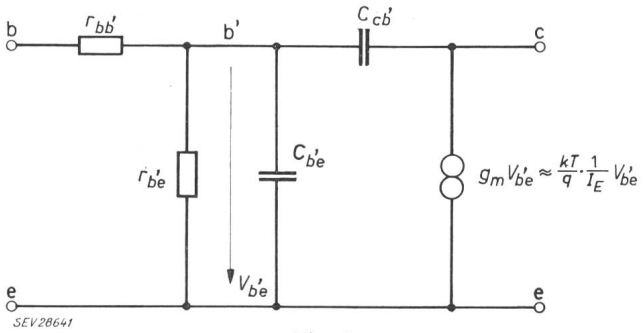

Fig. 8
Hybrid-π-Ersatzschema des Transistors in der Emitterschaltung
e Emitter; b Basis; b' interner Basispunkt; c Kollektor
$r_{bb'}$ Basiswiderstand; $r_{b'e}$ Emitterwiderstand; $C_{b'c}$ Kollektorkapazität; g_m Steilheit; $V_{b'e}$ Wechselspannung zwischen interner Basis und Emitter; I_E Emittergleichstrom

3. Technologie von Hochfrequenz-Transistoren

Technologisch betrachtet sind für den Bau von Hochfrequenztransistoren folgende Punkte zu beachten:

1. Möglichst kleine Basisbreite w, um einen hohen Wert von $f_{c\alpha}$ zu erhalten.

2. Möglichst kleine Ausdehnung der Junctionfläche, damit die Raumladungskapazitäten der p-n-Übergänge klein bleiben.

3. Abnehmende Verunreinigungskonzentration im Basisraum vom Emitter zum Kollektor. Damit erreicht man nicht nur eine weitere Vergrösserung der Grenzfrequenz, sondern auch kleine Werte von r_b und C_{Tc}.

Für die Herstellung der nicht homogenen und zudem sehr dünnen Basis kommt hauptsächlich die Diffusionstechnik in Frage. Den Emitterübergang kann man entweder durch Legieren oder auch wieder durch Diffusion erhalten.

Im folgenden soll die Herstellungstechnik von Hochfrequenztransistoren beschrieben werden, und es werden auch Angaben bezüglich ihres Verhaltens gemacht:

3.1 Der Pushed out base-Transistor (Philips) [11]

Es ist dies ein legiert-diffundierter p-n-p-Germaniumtransistor, wie in Fig. 9 schematisch dargestellt. Auf ein dünnes Plättchen p-Germanium von 2 Ωcm spezifischem Widerstand werden zwei Kügelchen aus Wismut fixiert. Das Kügelchen b enthält nur einen n-Bildner, nämlich Antimon, während sich im Kügelchen e sowohl ein p-, wie auch ein

n-Bildner, nämlich Aluminium, bzw. Antimon, befinden. Wird dieses System erhitzt, löst sich das Germanium, bis für die eingestellte Temperatur ein Gleichgewicht entsteht, das einer bestimmten Eindringtiefe der Ge-Bi-Legierung entspricht. Lässt man das System für eine gewisse Zeit weiter auf

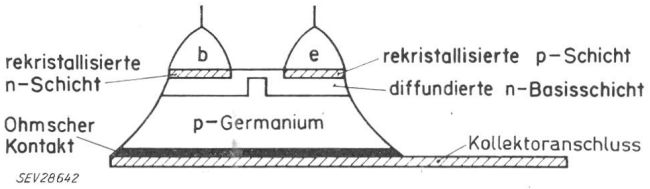

Fig. 9
Legiert-diffundierter Transistor (Pushed out base)
e Emitter; b Basis

konstanter Temperatur, tritt eine Diffusion des Antimons in das p-Germanium ein, während der Diffusionskoeffizient von Aluminium bei der eingestellten Temperatur zu klein ist, um ein merkliches Eindringen zu erhalten. Das Antimon dringt von der Schmelze in das feste Germanium, so dass eine diffundierte n-Schicht unter den geschmolzenen Kügelchen entsteht: die Basisschicht. Da aber im Ofen durch das Verdampfen von Antimon aus den beiden Kügelchen eine arsenhaltige Atmosphäre entsteht, findet eine Diffusion über die ganze Oberfläche statt. Beim Abkühlen erfolgt eine normale Rekristallisation, wobei unterhalb des Kügelchens e diese Rekristallisationszone Aluminium enthält und so auf der diffundierten n-Schicht eine weitere legierte p-Schicht bildet: den Emitter. Das Kügelchen b sorgt für einen Ohmschen Anschlusskontakt an die Basisschicht. Nachträglich wird die oberflächlich diffundierte n-Schicht sowie ein Teil des ursprünglichen p-Germaniumplättchens weggeätzt. Dabei wird der Raum zwischen den beiden Kügelchen maskiert, so dass eine Brücke von n-Germanium bestehen bleibt. Schlussendlich wird das Plättchen, der Kollektor, auf einen Nickelstreifen gelötet, und es werden Kontakte an Emitter und Basis hergestellt. Die Dicke der Basisschicht beträgt ca. 2 μm. Durch einen kleinen Durchmesser der Kügelchen von nur etwa 150 μm, und durch Wegätzen alles überflüssigen Germaniums rund um den Emitter und den Basisanschluss, erhält man sehr kleine Kapazitäten. Allerdings macht sich der Einfluss der Emittersperrschichtkapazität auf die Grenzfrequenz schon bemerkbar, so dass diese stark stromabhängig wird. Bei einem Emitterstrom von 1 mA und einer Kollektorspannung von −6 V (vom Hersteller gegebener Arbeitspunkt) erreicht man leicht eine Grenzfrequenz von mehr als 100 MHz und eine Kollektorsperrschichtkapazität von 1...2 pF. Der Basiswiderstand liegt bei etwa 60 Ω. Dieser Transistor mit sehr guten HF-Eigenschaften zeichnet sich vor allem durch den relativ einfachen Herstellungsprozess aus.

3.2 Der Micro-Alloy Diffused Transistor (Philco) [12] *MADT*

Auch hier handelt es sich um einen p-n-p-Germaniumtransistor mit Driftfeld. Zunächst wird aus der Gasphase in ein n-Germaniumplättchen von richtiger Dicke und hohem spezifischem Widerstand ein weiterer n-Bildner (Arsen oder Phosphor) eindiffundiert. Man erhält dadurch auf der Oberfläche eine dünne Schicht mit erhöhter, gegen das Zentrum des Plättchens hin abnehmender Donatorenkonzentration. Auf beiden Seiten des Plättchens werden mit dem vom «Surface barrier Transistor» her bekannten Verfahren der elektrolytischen Strahlätzung [13] Löcher eingeätzt und in diese Löcher Elektroden platiert. Während für den Kollektor reines Indium genügt, muss emitterseitig der galvanische Metallniederschlag Gallium enthalten, um einen hohen Emitterwirkungsgrad zu gewährleisten. Durch eine relativ schwache Erwärmung werden diese Kontakte leicht in das Germanium einlegiert, wobei die Eindringtiefe nur ca. 0,2 μm beträgt. Die Dicke der diffundierten Donatorenschicht von 1...5 μm, die Tiefe der Ätzgruben, welche kollektorseitig bedeutend tiefer ist und auch die mechanische Basisbreite w_0 von 3...10 μm hängt stark von den gewünschten elektrischen Eigenschaften ab, welche der Transistor aufweisen soll (Fig. 10).

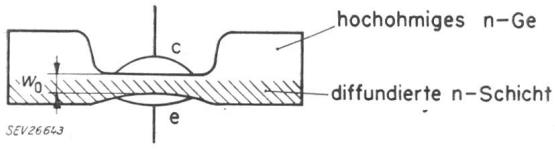

Fig. 10
Micro-Alloy-Diffused-Transistor
e Emitter von ca. 110 μm Durchmesser; c Kollektor von ca. 180 μm Durchmesser; w_0 mechanische Basisbreite

Für einen Schalttransistor mit einer Schaltzeit von 5...10 ns[2]) wird die Kollektorgrube bis zur relativ dicken diffundierten Schicht auf der Emitterseite ausgedehnt, und die Tiefe der Emittergrube erstreckt sich in ein Gebiet, in welchem die Donatorenkonzentration noch ca. 10^{16} cm^{-3} beträgt. Dadurch erhält man hohe Grenzfrequenzen bei kleiner Kollektorspannung und emitterseitig eine Durchschlagspannung von mehr als 2 V.

Für einen HF-Verstärker-Transistor mit sehr dünner diffundierter n-Schicht dringt man mit dem Kollektor nicht bis zu dieser vor. Durch Anlegen einer relativ hohen Kollektorspannung wird die Verarmungsschicht breit, bis sie die diffundierte Schicht erreicht. Die elektrische Basisbreite wird dadurch kleiner als die mechanische, und man erhält Transistoren mit einer sehr hohen, allerdings spannungsabhängigen Grenzfrequenz und sehr kleinen Kollektorkapazitäten. Bei einer Kollektorspannung von 10...15 V beträgt die Grenzfrequenz über 500 MHz und die Kapazität C_{Tc} weniger als 1 pF. Wird gleichzeitig der Emitter relativ schwach eingeätzt, kommt man bei kleinen Werten des Basiswiderstandes auf emitterseitige Durchschlagsspannungen von 0,5...1 V, die für Verstärkeranwendungen vollauf genügen.

Diese Technik erlaubt also durch leichte Variationen bei sehr guter Kontrolle der Prozesse die Herstellung von Transistoren mit verschiedenen elektrischen Eigenschaften.

[2]) 1 ns (Nanosekunde) = 1 mμs. (Die Bezeichnung mμs soll vermieden werden.)

3.3 *Mesa-Transistoren (Bell und Andere)*

Bei diesen Transistoren sind sowohl Basis, als auch Emitter diffundiert, wobei Germanium oder Silizium als Ausgangsmaterial dienen kann [14; 15]. Durch sehr kleine Junctionflächen und durch Abätzen des überflüssigen Materials rund um die Übergänge erreicht man sehr kleine Kapazitäten. Diese Ätzung verleiht den Transistoren die Form einer «mesa», der Tafelberge in Amerika, nach denen sie benannt wurden. Für die verschiedenen Herstellungsverfahren werden ausser der Diffusionstechnik heute besonders die selektive Maskierung durch Oxydschichten für das Diffundieren und das Photoresistverfahren für die Ätztechnik verwendet. Während z. B. Gallium, ein p-Bildner, durch eine Schicht von Siliziumoxyd diffundiert, bildet diese Oxydschicht für Phosphor eine Barriere. Man kann in ein oxydiertes Silizium-Plättchen zunächst mit Gallium eine p-Schicht diffundieren. Mit Hilfe des bekannten Photoresistverfahrens ist es möglich, eine sehr kleine Fläche des Oxydes wegzuätzen, in die nun auf diese p-Schicht mit Phosphor eine weitere n-Schicht diffundiert werden kann. Beim Photoresistverfahren wird das Siliziumplättchen in eine lichtempfindliche Lösung (Photoresist) getaucht. Nach erfolgter Belichtung wird entwickelt und auf den unbelichteten Teilen der Schutzlack wieder weggelöst, so dass dort die Ätzlösung angreifen kann. Später werden durch geeignete Lösungsmittel auch die belichteten Stellen wieder gereinigt. Man erhält so eine n-p-n-Struktur mit einer sehr dünnen und gut reproduzierbaren Breite der p-Schicht. Die elektrischen Kontakte werden meist durch Aufdampfen von Metallen durch eine Maske hergestellt. Zuletzt wird wieder mit Hilfe des Photoresistverfahrens die Mesastruktur freigeätzt.

Bei Kollektorkapazitäten von weniger als 1 pF ist es mit dieser Technik gelungen, Transistoren herzustellen, die eine Grenzfrequenz bis 1000 MHz aufweisen, wobei die Kollektorverlustleistung ca. 50 mW beträgt.

Man hat nach dem gleichen Prinzip mit grösseren Flächen auch Leistungstransistoren mit einer Grenzfrequenz $f_{c\alpha}$ von fast 100 MHz, und einer Kollektorverlustleistung von einigen Watt hergestellt. Als Verstärker wurde mit einem solchen Transistor bei einer Frequenz von 10 MHz eine Verstärkung von 20 db und eine Ausgangsleistung von 5 W erzielt. Als Oszillator gibt er bei einer Frequenz von 100 MHz noch eine Leistung von 1 W ab [18].

4. Gesteuerte Gleichrichter (Thyratrontransistoren)

Um das Verhalten dieser Halbleitervorrichtungen erklären zu können, müssen die folgenden, allgemeinen Punkte erwähnt werden:

a) Die Sperrspannung über einem p-n-Übergang kann natürlich nicht beliebig erhöht werden, ohne dass der Strom ebenfalls steigt. Durch die Beschleunigung der Ladungsträger in der Raumladungsschicht des Überganges erfolgt ähnlich einer Gasentladung eine Lawinenmultiplikation. Dies hat zur Folge, dass der Strom, oder im Falle eines Transistors auch der Verstärkungsfaktor α mit einem Faktor M multipliziert wird, wobei M von der angelegten Sperrspannung abhängig ist und bei einem bestimmten Wert der Spannung, der Durchbruchspannung V_B, sogar unendlich wird. Die Grösse von V_B nimmt mit steigendem Widerstandswert des Halbleiters allgemein zu, und die Art der Abhängigkeit ist durch den Charakter des Überganges und durch die Wahl des Halbleiters bestimmt.

b) Der Wert von α ist ausserdem vom Emitterstrom abhängig und fällt besonders beim Silizium für sehr kleine Werte von I_E stark ab. Betrachtet man eine p-n-p-n-Struktur mit angelegter Spannung, wie es die Fig. 11 zeigt, werden bei der gewählten

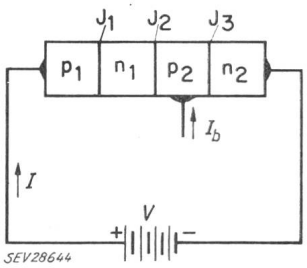

Fig. 11
p-n-p-n-Transistor
I Strom; V Spannung; I_b Steuerstrom; $J_1 \ldots J_2$ Übergänge 1...3

Polarität der Übergang 2 in der Sperrichtung und die Übergänge 1 und 3 in der Durchlassrichtung vorgespannt [19]. Fasst man ferner die Struktur p_1-n_1-p_2 und n_1-p_2-n_2 als zwei hintereinandergeschaltete Transistoren mit der Stromverstärkung α_1, bzw. α_2 auf, so wirken die Übergänge 1 und 3 als Emitter und der gemeinsame Übergang 2 als Kollektor, der einen Multiplikationsfaktor M_1 für die Löcher und M_2 für die Elektronen und einen Nullstrom I_{co} hat. Der Gesamtstrom I muss gleich dem Strom durch den Übergang 2 sein, woraus folgt:

$$I = I\,M_1\,\alpha_1 + I\,M_2\,\alpha_2 + I_{co} \qquad (10)$$

oder:

$$I = \frac{I_{co}}{1 - M_1\,\alpha_1 - M_2\,\alpha_2} = \frac{I_{co}}{1 - \alpha_t} \qquad (11)$$

Solange die kombinierte Stromverstärkung $\alpha_t < 1$ bleibt, ist der Strom durch die Diode nur klein, was bei kleinen Spannungen der Fall ist. Mit zunehmender Spannung V nehmen die Faktoren M_1 und M_2 zu, bis bei einer bestimmten Spannung V_r $\alpha_t \geqq 1$ wird. Damit steigt der Strom I stark an, so dass die Werte von α_1 und α_2 ebenfalls zunehmen.

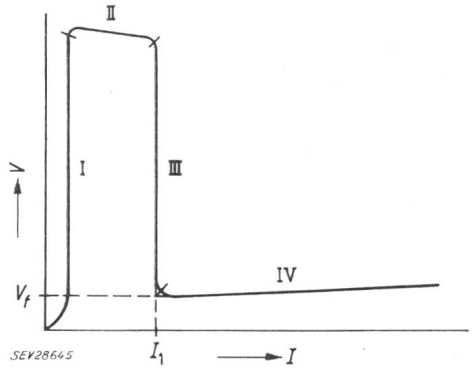

Fig. 12
Charakteristik eines p-n-p-n-Transistors
V Sperrspannung; V_f Spannungsabfall im leitenden Zustand; I_1 kleinster Strom, bei dem der Transistor leitend bleibt; I...IV Bereiche der Charakteristik

Bei $I = I_1$ bleibt α_t auch bei einer Spannung $V < V_r$ grösser als 1. Man kann nun zeigen, dass dadurch der Übergang 2 eine Vorspannung in der Durchlassrichtung bekommt. Dann ist der Spannungsabfall über der leitenden Diode nur sehr klein, so dass der Strom I im wesentlichen durch die äusseren Schaltelemente begrenzt wird. Diese Charakteristik der Diode ist in der Fig. 12 gezeigt. Darin kann man vier Bereiche unterscheiden, von denen jedoch nur I und IV stabil sind, d. h. die Diode schaltet von einem gesperrten Zustand mit hohem Widerstand beim Anlegen einer Spannung $V > V_r$ in einen Durchlasszustand mit sehr kleiner Haltespannung V_f und kleinem Durchlasswiderstand. Um den Zustand I wieder zu erreichen, muss man z. B. den äusseren Stromkreis unterbrechen.

Versieht man die p_2-Schicht mit einem weiteren Kontakt, kann man durch den Strom I_b über diesen Kontakt den Wert von α_2 beeinflussen und damit erreichen, dass die Diode schon bei einer Spannung $V_z < V_r$ leitend wird [20; 21]. Natürlich ist bis zu einem gewissen Grad die Zündspannung von I_b abhängig, was für die praktische Anwendung in den meisten Fällen unwichtig ist, da die Zündung in einem gewissen Zeitpunkt durch einen Stromimpuls I_b erfolgt. Gibt man beispielsweise auf eine solche Diode eine einfach gleichgerichtete Wechselspannung und mit einer Phasenverschiebung zwischen 0 und 180° einen Stromimpuls I_b, so entsteht über einem äusseren Belastungswiderstand eine von der Phase des Zündwinkels abhängige Spannung. Diese Schaltung hat also genau die gleichen Eigenschaften wie ein Thyratron und kann, sofern V_r und der zulässige Strom genügen, für die Spannungsregelung von Gleichrichtern oder die Drehzahlregelung von Motoren verwendet werden.

Zur Herstellung dieser Thyratrontransistoren bedient man sich wieder der kombinierten Diffusions- und Legierungstechnik oder der doppelten Diffusion.

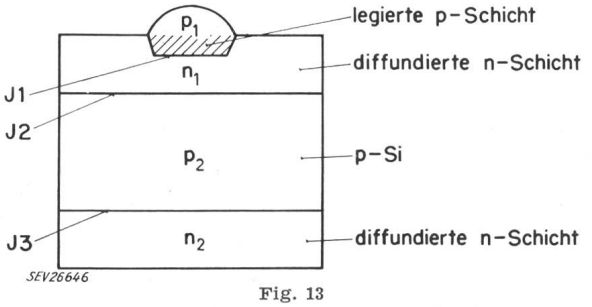

Fig. 13
Legiert-diffundierter gesteuerter Gleichrichter
$J_1 \ldots J_3$ Übergänge 1...3; *Si* Silizium

Bei der in Fig. 13 gezeichneten Struktur werden in ein Plättchen aus p-Silizium auf beiden Seiten Donatoren diffundiert, und schlussendlich wird auf eine der beiden diffundierten n-Regionen eine weitere p-Schicht einlegiert. Der Übergang J_2 von der diffundierten n- zur ursprünglichen Schicht von p-Silizium kann durch Wahl eines hochohmigen Ausgangsmaterials spannungsfest gemacht werden.

Fig. 14 zeigt einen mit doppelter Diffusion hergestellten gesteuerten Gleichrichter. Auf ein Plättchen aus n-Silizium wird zunächst ein p-Bildner und danach mit Hilfe der oben beschriebenen Maskierungs- und Ätztechnik über das halbe Plättchen in diese p-Schicht ein n-Bildner diffundiert. Auch hier liegt der für die Sperrspannung entscheidende Übergang 2 am Ausgangsmaterial. Um das Schaltverhalten zu beeinflussen, kann man die Dicke der einzelnen Schichten variieren, wobei man z. B. so vorgeht, dass der eine Stromverstärkungsfaktor α_2 in der Grössenordnung 0,9 liegt, während man den andern nur klein wählt.

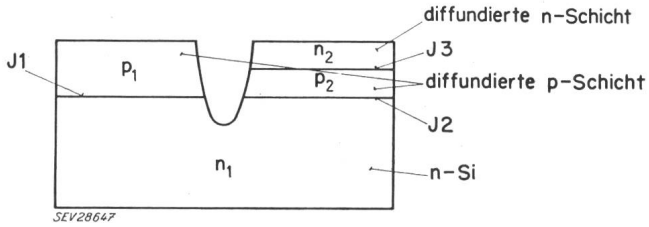

Fig. 14
Doppelt diffundierter gesteuerter Gleichrichter
$J_1 \ldots J_3$ Übergänge 1...3

Heute sind solche p-n-p-n-Trioden realisiert, die eine Sperrspannung von 400 V aufweisen und im Durchlassbereich einen Dauerstrom bis 20 A ertragen. Der Rückstrom im Sperrbereich ist nur sehr klein, einige μA, und der nötige Steuerstrom bei geringer Steuerspannung liegt in der Grössenordnung von 100 μA. Damit ist man bereits in den Bereich des Starkstromthyratrons vorgedrungen.

Literatur

[1] *Johnson, H.:* Basic Transistor Device Concepts in «Transistor I», hg. v. den *«RCA Laboratories»;* Princeton N. J.: 1956. S. 1...26.

[2] *Pritchard, R. L.:* Advances in the Understanding of the p-n Junction Triode. Proc. IRE Bd. 46(1958), Nr. 6, S. 1130...1141.

[3] *Early, J. M.:* P-n-i-p and n-p-i-n Junction Transistor Triodes. Bell Syst. techn. J. Bd. 33(1954), Nr. 3, S. 517...533.

[4] *Burcham, N. P.; L. E. Miller, T. R. Robillard u. a.:* Germanium Alloy Junction Transistors in «Transistor Technology», Bd. 3, hg. v. *F. J. Biondi;* Princeton N. J. a. o.: Van Nostrand 1958. Kap. 7, Sekt. 7A, S. 175...220.

[5] *Fuller, C. S.:* Diffusion Techniques in «Transistor Technology», Bd. 3, hg. v. *F. J. Biondi;* Princeton N. J. a. o.: Van Nostrand 1958. Kap. 3, Sekt. 3A, S. 64...89.

[6] *Smits, F. M.:* Formation of Junction Structures by Solid-State Diffusion. Proc. IRE Bd. 46(1958), Nr. 6, S. 1049...1061.

[7] *Pritchard, R. L.:* AIEE Winter Meeting 1954, New York.

[8] *Kroemer, H.:* The Drift Transistor in «Transistor I», hg. v. den *«RCA Laboratories»;* Princeton N. J.: 1956. S. 202...220.

[9] *Moll, J. L.* und *I. M. Ross:* The Dependence of Transistor Parameters on the Distribution of Base Layer Resistivity in «Transistor Technology», Bd. 2, hg. v. *F. J. Biondi;* Princeton N. J. a. o.: Van Nostrand 1958. Kap. 5, Sekt. 5I, S. 392...404.

[10] *Thomas, D. E.* und *J. L. Moll:* Junction Transistor Short-Circuit Current Gain and Phase Determination. Proc. IRE Bd. 46(1958), Nr. 6, S. 1177...1184.

[11] *Jochems, P. J. W., O. W. Memelink* und *L. J. Tummers:* Construction and Electrical Properties of a Germanium Alloy-Diffused Transistor. Proc. IRE Bd. 46(1958), Nr. 6, S. 1161...1165.

[12] *Thornton, C. G.* und *J. B. Angell:* Technology of Micro-Alloy Diffused Transistors. Proc. IRE Bd. 46(1958), Nr. 6, S. 1166...1176.

[13] *Tiley, J. W.* und *R. A. Williams:* Electrochemical Techniques for Fabrication of Surface-Barrier Transistors. Proc. IRE Bd. 41(1953), Nr. 12, S. 1706...1708.

[14] *Tanenbaum, M.* und *D. E. Thomas:* Diffused Emitter and Base Silicon Transistors. Bell. Syst. techn. J. Bd. 35(1956), Nr. 1, S. 1...22.

[15] *Lee, C. A.:* A High-Frequency Diffused Base Germanium Transistor. Bell Syst. techn. J. Bd. 35(1956), Nr. 1, S. 23...24.

[16] *Frosch, C. J.* und *L. Derick:* Surface Protection and Selective Masking During Diffusion in Silicon. J. Electrochem. Soc. Bd. 104(1957), Nr. 9, S. 547...552.

[17] *Andrus, J.* und *W. L. Bond:* Photoengraving in Transistor Fabrication in «Transistor Technology», Bd. 3, hg. v. *F. J.*

Biondi, Princeton N. J. a. o.: Van Nostrand 1958. Kap. 5, Sekt. 5E, S. 151...162.

[18] *Nelson, J. T., J. E. Jwersen* und *F. Keywell:* A Five-Watt Ten-Megacycle Transistor. Proc. IRE Bd. 46(1958), Nr. 6, S. 1209...1215.

[19] *Moll, J. L., M. Tanenbaum, J. M. Godley u. a.:* P-n-p-n Transistor Switches. Proc. IRE Bd. 44(1956), Nr. 9, S. 1174...1182.

[20] *Mackintosh, I. M.:* The Electrical Characteristics of Silicon p-n-p-n Triodes. Proc. IRE Bd. 46(1958), Nr. 6, S. 1229...1235.

[21] *Aldrich, R. W.* und *N. Holonyak:* Multiterminal p-n-p-n Switches. Proc. IRE Bd. 46(1958), Nr. 6, S. 1236...1239.

Adresse des Autors:
F. Winiger, dipl. Ingenieur, Philips AG, Edenstrasse 20, Postfach Zürich 27.

Übermittlungssysteme hoher Kapazität

Vortrag, gehalten an der 23. Hochfrequenztagung des SEV am 28. Oktober 1959 in Luzern,
von *W. Neu*, Harlow

621.395.43

Die Arbeit soll eine Übersicht geben über vorhandene und geplante Übermittlungssysteme, welche die gleichzeitige Übertragung von mehreren tausend Telephongesprächen oder einigen Fernsehbildern gestatten. Zuerst wird die bisherige Entwicklung der Kabel- und Richtstrahltechnik kurz zusammengefasst. Dann werden neue Möglichkeiten, insbesondere die Übertragung durch Wellenleiter, besprochen. Zum Schluss wird die Code-Modulation und ihr Einfluss auf die Übermittlungstechnik dargestellt.

Aperçu des systèmes de transmission existants ou prévus, permettant de transmettre simultanément plusieurs milliers de communications téléphoniques ou quelques images télévisées. Le conférencier décrit tout d'abord l'évolution de la technique des câbles et des faisceaux directifs, puis indique les nouvelles possibilités, notamment la transmission par guides d'ondes. Pour terminer, il s'occupe de la modulation codée et de son influence sur la technique des transmissions.

1. Bisherige Systeme

Wenn man die Entwicklung des Telephons, Fernsehens und anderer Übermittlungsdienste betrachtet, so wird es verständlich, dass die Techniker bald vor dem Problem stehen werden, gleichzeitig tausende von Telephongesprächen und mehrere Fernsehbilder zu übertragen. Dazu stehen im wesentlichen drei Übertragungsmittel zur Verfügung:

a) Koaxialkabel;
b) Richtstrahlverbindungen;
c) Wellenleiter.

Die ersten beiden haben sich schon weitgehend eingeführt, die dritte Übertragungsart ist dagegen noch im experimentellen Stadium.

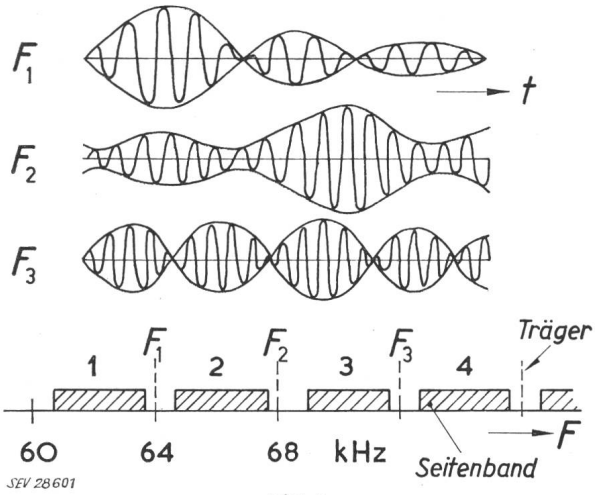

Fig. 1
Prinzip des Frequenz-Multiplex-Übertragungssystems
t Zeit; F_1, F_2, F_3 Trägerfrequenzen

Unabhängig vom Übertragungsmedium haben wir zwei grundsätzlich verschiedene Methoden der Modulation und Zusammenfassung vieler Sprechkanäle zur Verfügung, nämlich:

a) Frequenz-Multiplex-Übertragungssystem (Fig. 1);
b) Zeit-Multiplex-Übertragungssystem (Fig. 2).

Bis jetzt wurde fast ausschliesslich das Frequenz-Multiplex-System verwendet. Im Zusammenhang mit der Code-Modulation wird nun jedoch auch das Zeit-Multiplex-System aktuell.

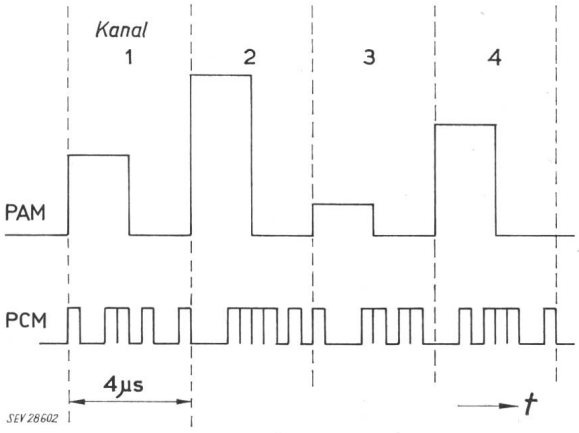

Fig. 2
Prinzip des Zeit-Multiplex-Übertragungssystems
PAM Puls-Amplituden-Modulation; PCM Puls-Code-Modulation; t Zeit

1.1 Koaxialkabel

Das für den Fernverkehr genormte Koaxialkabel (Fig. 3) besteht aus einem Kupferdraht, der mit Hilfe von Polythenscheiben in einem «koaxialen» Kupferrohr von 9,52 mm Innendurchmesser festgehalten wird. Neuerdings werden auch kleinere Kabel von 4...6 mm Durchmesser und Polythenschaum-Isolation verwendet.

Zur Übertragung auf dem Kabel wird jedes Gespräch auf eine andere Trägerfrequenz aufmoduliert. Um Bandbreite zu sparen, wird die Einseitenbandmodulation mit unterdrücktem Träger verwendet, wobei der frequenzmässige Abstand der Träger