

Wechselstrom-Transistor

Ákos Kun, 1 Fachingenieur für Elektrotechnik, Budapest
Anmeldungsstag: 3. 11. 1977

Der erfundene Wechselstrom-Transistor stellt ein Halbleiterelement mit bipolarem Charakter dar, das durch seinen symmetrischen Schichtaufbau zur kontinuierlichen, verzerrungsfreien Regelung und hocheffektiver Schaltung elektrischer Grössen geeignet ist.

Die sich im ausserordentlich schnellen Tempo entwickelnde Elektronik bringt immer neuere Halbleiterelemente zur Befriedigung der erhöhten Bedürfnisse hervor. Dieser schnelle Entwicklungsprozess wird noch durch die Erscheinung beschleunigt, dass im Gegensatz zu den anderen Industriezweigen die Anwenderansprüche in der Elektronikindustrie immer höher liegen, als wie durch die gerade verwendete Technologie erreichbar ist. Nach der Entwicklung und Massenanwendung verschiedener Transistortypen im Gleichspannungssystem richtete sich der Hauptaugenmerk auf die Regel- und Schaltelemente auf Halbleiterbasis für Wechselstrom. Das erste Ergebnis dieses Entwicklungsvorganges war die Vierschichtdiode /Abb. 1/, nach der in schneller Folge die darauf aufbauenden, komplexeren Typen entstanden: Zweiwege-Thyristordiode /Diac/, kathodengesteuerter Thyristor, anodengesteuerter Thyristor, Lawinenthystor, lichtaktivierter Thyristor, Zweiweg-Thyristortriode /Triac/, Thyristor-

diode mit Sperrelektrode und andere, im Entwicklungsstadium befindliche Typen. Grundsätzlich ist das Funktionsprinzip der verschiedenen Mehrschichtdioden nicht mit dem von Transistoren vergleichbar, so dass bei ihrer Verwendung als Regelelement wesentlich andere schaltungstechnische Ansprüche gestellt werden, als wie sie in der Transistortechnik bekannt sind. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Halbleiterelementen besteht darin, dass die Durchlassfähigkeit von Transistoren vom Sperrzustand bis zur Sättigung stetig regelbar ist, während die Mehrschichtdioden - ähnlich wie die herkömmlichen Dioden - nur zwei Zustände annehmen können; entweder sind sie völlig gesperrt oder völlig in Durchlassrichtung geschaltet. Dieser prinzipielle Unterschied in der Funktion führte zwangsläufig zu den schaltungstechnischen Veränderungen beim Einsatz von Mehrschichtdioden. Hauptbestandteil dieser Schaltungen ist die Steuereinheit, die es ermöglicht, die Mehrschichtdioden mit zwei Zuständen nicht nur als steuerbares Schaltelement, sondern auch als Regelelement einsetzen zu können. Da die Mehrschichtdioden in einer beliebigen Schaltung ihren Diodencharakter beibehalten, ist für ihre Ansteuerung ein Steuerkreis zu entwickeln, der anstelle der Amplitude der durchfliessenden elektrischen Grösse deren Flusswinkel beeinflusst. In Wechselstromkreisen ist die stetige Regelung der sich periodenweise ändernden elektrischen Grössen in der Weise erreichbar, dass die Mehrschichtdiode durch die Steuereinheit nur in einer bestimmten Phase der elektrischen Grösse einge-

schaltet wird. Nach periodenweiser Summierung der angeschnittenen Phasen entsteht im Effektivwert die herabgeregelte elektrische Grösse.

Im einfachsten Fall ist die stetige Regelung von Wechselstrom mit Hilfe einer Einweg-Thyristordiode möglich. Eine entsprechende Ausführungsform ist auf Abb. 2 dargestellt, wobei die maximale Belastbarkeit 5 A und der Regelbereich 0...220 V beträgt. Aus den Kennlinien unter der Abbildung geht hervor, dass der in der Schaltung verwendete Thyristor mit Kathodensteuerung die Regelung des Wechselstroms in zwei Stufen durchführt. Von einer Gleichrichtereinheit wird die Wechselspannung zunächst in eine pulsierende Gleichspannung umgewandelt, aus der nach der Phasenanschnittsteuerung im Thyristor in der Gleichrichtereinheit die Rückwandlung der herabgeregelten elektrischen Grösse in eine Wechselgrösse erfolgt. Eine wesentlich einfachere Schaltungsvariante als bei dieser Mehrfachregelung ergibt sich durch Einsatz der aus den Thyristerdioden weiterentwickelten Thyristortrioden oder Triacs. Letztere machen, da sie aufgrund ihres Schichtaufbaus in beiden Richtungen beansprucht werden können, die Umwandlung der Wechselspannung in eine pulsierende Gleichspannung für überflüssig.

Obwohl die Technik der Mehrschichtdioden in immer mehr Bereichen Anwendung findet, besitzt sie mehrere Nachteile, die ihrer schnellen Verbreitung entgegenwirkt. Einer dieser Nachteile ist ihre hohe Empfindlichkeit gegenüber Überspannungen und -strömen, die bei Nichtbeachtung der vorge-

schriebenen Grenzwerte leicht zu ihrer Zerstörung führen kann. Zu dieser hohen Empfindlichkeit kommt noch der komplizierte Schichtaufbau, der im Vergleich zu anderen Halbleiterbauelementen relativ hohe Herstellungskosten verursacht. Diese nachteiligen Eigenschaften können durch den erfundenen Wechselstromtransistor vermieden werden, der bei linearem Betrieb keine zusätzlichen Steuerkreise benötigt, da er im Gegensatz zu den Mehrschichtdioden nicht nach dem Phasenanschnittverfahren, sondern mit Amplitudenverringerng arbeitet und deshalb in dieser Betriebsart eine Spannung frei von Transientenerscheinungen und ohne Signalverzerrung liefert. Da in seiner physikalischen Funktion der Schichtaufbau des Wechselstromtransistors mit dem herkömmlicher Transistoren übereinstimmt, sei an dieser Stelle zunächst auf den Funktionsmechanismus der in Gleichstromkreisen allgemein verwendeten bipolaren Schichttransistoren eingegangen.

Angenommen, an den pnp -Transistor nach Abb. 3 wird eine externe Spannung in Durchlassrichtung angelegt. Da beim Anlegen einer Durchlassspannung die Emitter-Basis-Strecke eines beliebigen bipolaren Schichttransistors in Durchlassrichtung, die Kollektor-Basis-Strecke in Sperrichtung beansprucht werden, kann die Struktur des Schichttransistors in zwei Teile aufgespalten werden. Der erste Teil stellt die in Durchlassrichtung beanspruchte Basis-Emitter-Strecke dar, die in ihrer Funktion einer asymmetrisch dotierten Diode entspricht. Diese asymmetrische Dotierung besitzt für die Transistorwirkung eine ausserordentliche grosse Bedeutung,

so dass es zweckmässig ist, den Schichtaufbau herkömmlicher Dioden näher zu erläutern.

Bekannterweise tritt im spannungslosen Zustand zwischen den zwei Halbleiterschichten unterschiedlicher Ladungsträger einer beliebigen Diode ein gegenseitiger Ausgleichsprozess auf, unter dessen Wirkung die Neutralität der Grenzschicht verschwindet und die p-Schicht auf negatives, die n-Schicht auf positives Potential gelangt. Da es sich bei diesem Vorgang um einen selbstbegrenzenden Prozess handelt, kommt nach einer Zeit zwischen den Majoritätsladungsträgern der beiden Schichten das Gleichgewicht zustande und in der Grenzschicht entsteht die Diffusionsspannung. Wenn der Konzentrationsunterschied zwischen den Minoritäts- und Majoritätsladungsträgern der beiden Schichten gleich gross ist, kommt es in der Grenzschicht zu einer symmetrischen Diffusion, d.h. die Diffusionsspannung verteilt sich zu gleichen Teilen auf die zwei Halbleiterschichten unterschiedlicher Ladung, aber gleicher Konzentration. Bei unterschiedlicher Konzentration, d.h., wenn in einer Schicht der Konzentrationsunterschied zwischen den Minoritäts- und Majoritätsladungsträgern kleiner ist als in der anderen, kommt in der Grenzschicht eine verschobene, asymmetrische Diffusion zustande. Die durch die Diffusion in der Grenzschicht hervorgerufene entleerte Zone verschiebt sich in dem Masse in die Schicht mit niedrigerer Konzentration, wie gross der Unterschied zwischen den Konzentrationen der beiden Schichten ist.

Unter Annahme einer symmetrischen Dotierung der beiden Schichten, soll an die Diode eine äussere, bis Null herabregelbare Spannung angelegt werden. Bei allmählicher Erhöhung der äusseren Spannung beginnt über einen bestimmten Spannungspegel nach der bekannten Durchlasscharakteristik der Diode der Stromfluss zwischen den beiden Halbleiterschichten. Dieser Spannungspegel stellt die sog. Schwellspannung dar, die nach Abbau der Potentialsperrre, die durch die Diffusionsspannung in der Grenzschicht erzeugt wird, das allmähliche Diffundieren der Ladungsträger ermöglicht. Mit Erhöhung der äusseren Spannung wächst auch der Ladungsträgerstrom in der Grenzschicht an und damit der Durchlassstrom der Diode. Bei weiterer Erhöhung der Durchlassspannung kommt es, wenn dem stark ansteigenden Ladungsträgerstrom keine Grenze gesetzt wird, zwischen den zwei Halbleiterschichten zum thermischen Durchbruch, der zur Zerstörung der Diode führt. Um den thermischen Durchbruch zu vermeiden, schaltet man einen Serienwiderstand in den Stromweg ein, der den Ladungsträgerstrom auf einen noch zulässigen Wert begrenzt. Wenn man die Verhältnisse untersucht, die bei unterschiedlichen Konzentrationen in den beiden Halbleiterschichten auftreten, kann aus der obigen Beschreibung festgestellt werden, dass in diesem Falle in der Grenzschicht ein asymmetrisches Diffusionsfeld entsteht. Dieses Feld wird in der Masse in Richtung der Schicht mit niedrigerer Konzentration verschoben, wie gross der Dotierungsunterschied zwischen den beiden Schichten ist.

Betrachtet man jetzt wieder die auf Abb. 3/a dargestellte, ebenfalls asymmetrisch dotierte Emitter-Basis-Schicht, so tritt auch hier beim Anlegen einer äusseren Spannung in Durchlassrichtung der Diodeneffekt auf, jedoch im Vergleich zum obigen Fall in einer etwas abweichenden Weise. Die Majoritätsladungsträger der Emitterschicht müssen wegen des verschobenen Diffusionsfeldes zur Rekombination in der Grenzsicht mit den negativen ~~Ladungsträger~~ der Basisschicht wesentlich weniger Energie aufbringen als die Ladungsträger der Basisschicht. Die kleine Zahl der Ladungsträger der Basis-schicht muss, um in die Grenzsicht zu gelangen, zunächst die in Richtung Basisschicht verschobene Diffusionsspannung überwinden und kann erst dann mit den Majoritätsladungsträgern des Emitters, die in die Grenzsicht eingeflossen sind, rekombinieren. Infolge dieser asymmetrischen Verhältnisse kann zwischen den beiden Halbleiterschichten nur ein Stromfluss unterschiedlicher Intensität zustande kommen, was zur Folge hat, dass der durch die Majoritätsladungsträger des Emitters erzeugte Emitterstrom wesentlich grösser ist als der durch die Majoritätsladungsträger der Basisschicht verursachte Basisstrom. Für den Transistor bedeutet das, dass von den Majoritätsladungsträger, die in grosser Zahl aus den Emitter ausströmen, wegen der geringen Zahl der Ladungsträger der Basisschicht nur ein geringer Teil in der Grenzsicht rekombinieren kann, der Grossteil dieser Ladungsträger häuft sich am Rande der entleerten Zone an. Die geringe Zahl rekombinierter Ladungsträger fliesst als Basisstrom aus der Basisschicht des Transistors.

Vor der weiteren Behandlung der Majoritätsladungsträger des Emitters, die sich vor der entleerten Zone angehäuft haben, sollen die Vorgänge, die in der Kollektorschicht ablaufen, untersucht werden. Aus der obigen Beschreibung geht hervor, dass zwischen zwei Halbleiterschichten im spannungslosen Zustand ein Diffusionsvorgang mit gegenseitigem Ausgleich abläuft. Dieser Vorgang kommt jedoch nicht nur in Halbleiterschichten unterschiedlicher Ladungsträger zustände, sondern - wie im vorliegenden Fall - auch zwischen der p-Schicht des Kollektors und dem metallischen, n-Anschluss des Kollektors. Die Konzentration des Kollektoranschlusses ist, da es sich um einen metallischen Leiter handelt, im Vergleich zur Kollektor-Halbleiterschicht praktisch unendlich gross. Dieser Konzentrationsunterschied ruft in der Grenzschicht ein stark verschobenes, asymmetrisches Diffusionsfeld hervor, das fast vollständig die Majoritätsladungsträger aus der Kollektor-Halbleiterschicht abzieht und dadurch der Bereich der Kollektor-Halbleiterschicht ausserhalb des Diffusionsfeldes einen neutralen Zustand annimmt. Beim Anlegen einer äusseren Sperrspannung nimmt die Ruhediffusionsspannung bei Halbleitern in bekannter Weise stark zu. Da mit der erhöhten Diffusionsspannung auch das Diffusionsfeld der Grenzschicht schmaler wird, bedeutet der Überschlag als Durchbruchsmöglichkeit für die Schichttransistoren keine Gefahr. Dies gilt jedoch nicht für den Lawineneffekt durch Raumemission, der bei zu hoher äusserer Spannung auch den Schichttransistor zerstören kann.

Etwas abweichende Verhältnisse ergeben sich in dem Falle, wenn sich dem metallischen Kollektoranschluss keine p-, sondern eine n-Halbleiterschicht anschliesst /nnp-Transistor/. Da im spannungslosen Zustand wegen der gleichartigen Majoritätsladungsträger in der Kollektorgrenzschicht keine spontane Diffusion auftreten kann, wird bei npn-Transistoren die Schicht abweichenden Potentials, die für die Diffusion in Sperrrichtung erforderlich ist, durch die äussere Sperrspannung erzeugt. Ein metallischer Leiter kann sich mit sehr hoher Konzentration sowohl auf negatives als auch positives Potential - im letzteren Falle scheinbar in Form von Elektronenabgabe - aufladen. Da die in der Kollektorgrenzschicht durch die Sperrspannung erzeugte starke Diffusionsspannung immer die entgegengesetzte Polarität zu den Majoritätsladungsträgern des Emitters aufweist, übt das verschobene Diffusionsfeld eine starke Anziehungskraft auf die Majoritätsladungsträger des Emitters aus, die in der entleerten Zone der Basis-Emitter-Schicht angehäuft sind und dort nicht rekombinieren können, so dass diese die Basis-Kollektor-Grenzschicht überwinden und mit grosser Geschwindigkeit auf den Kollektoranschluss gelangen. Der schnelle Ladungsträgerstrom in Richtung Emitter - Kollektor wird noch durch die weiter oben erwähnte Tatsache beschleunigt, dass nach dem Eintreten des Diffusionsgleichgewichtes die Bereiche ausserhalb des Ladungsbereiches in einen elektrisch neutralen Zustand gelangen. Das heisst, dass im gegebenen Fall die Majoritätsträger des Emitters keine abstossende

Kraft wie die Majoritätsladungsträger des Kollektors überwinden müssen. Nach seiner Funktion kann der bipolare Schichttransistor somit wie eine asymmetrisch dotierte Diode betrachtet werden, ergänzt mit einem Metall-Halbleiter-Kontakt.

Betrachten wir jetzt wieder den auf Abb. 3/a dargestellten Basis-Emitter-Schichtaufbau des in Durchlassrichtung vorgespannten npn-Transistors. Wie aus der obigen Beschreibung hervorgegangen ist, beginnt, nachdem die Durchlassspannung den Schwellwert der Basis-Emitter-Schicht erreicht hat, der Ladungsträgerfluss in Haupt- und Nebenrichtung. Die Spannung U_{EB} wird jetzt allmählich bis zum Wert der Versorgungsspannung erhöht. Mit Zunahme der Durchlassspannung wachsen sowohl die Haupt- als auch Nebenladungsträgerströme nach der bekannten Durchlasscharakteristik einer Diode und der Ausgangscharakteristik eines Transistors stark an. Dieser verstärkte Transistoreffekt ist physikalisch dadurch erklärbar, dass die Durchlassspannung trotz einer Beanspruchung in Sperrrichtung die Diffusionsspannung zwischen den Halbleiterschichten herabsetzt. Im vorliegenden Fall bedeutet die Herabsetzung der Diffusionsspannung zwischen der Emitter- und Basisschicht, dass die Potentialsperrschicht, die die zwei Schichten voneinander trennt, ebenfalls immer geringer wird und damit die Energie, die zur Rekombination der zu beiden Seiten der Grenzsicht angehäuften Ladungsträger in der entleerten Zone erforderlich ist. Der erhöhte Ladungsträgerfluss führt wegen den verschiedenen Transistorverlusten zu einer Verringerung des Wirkungsgrades, wodurch die zunächst ideale Ausgangskennlinie einen

linearen Verlauf annimmt. Grundsätzlich wird dadurch jedoch das Verhältnis Minoritätsträger zu Majoritätsträger nicht beeinflusst. Dieses günstige Verhältnis, nach dem zur Aufrechterhaltung des Ladungsträgerstromes in Hauptrichtung ein wesentlich geringerer, vom Stromverstärkungsfaktor des Transistors abhängiger Steuerstrom erforderlich ist, bleibt so lange erhalten, bis der Transistor durch die ständige Erhöhung der Durchlassspannung in die Sättigung gelangt. Bei noch weiterer Erhöhung der Spannung U_{EB} verschwindet der Transistoreffekt und die Basis-Emitter-Strecke wirkt wieder wie eine Diode. Die Versorgungsspannung wird jetzt auf den maximal zulässigen Wert der Emitter-Basis-Sperrspannung herabgesetzt, die Basis-Emitter-Spannung von T_1 wird auf den Wert der vollen Versorgungsspannung erhöht. Nach seiner physikalischen Funktion geht der Transistor vom Sättigungspunkt an aus einem steuerbaren Verstärkerelement allmählich in eine asymmetrische Kleinleistungsdiode über. Die Majoritätsladungsträger aus der Emitterschicht wählen anstelle des Kollektor-Arbeitswiderstandes in immer grösserer Zahl den Weg des geringeren Widerstandes und wandern zum Basisanschluss, der ein höheres Potential aufweist. Für diesen Betriebsbereich des Transistors ist der Arbeitsmechanismus von Gleichrichterdiolen gültig und der Basisstrom-Begrenzungswiderstand übernimmt anstelle der Regelung des Steuerstromes die Rolle des Arbeitswiderstandes der Emitter-Basis-Diode.

Im nächsten Schritt soll der erste Betriebsbereich, d.h. der Arbeitsbereich von der Schwellspannung bis zur Sättigung, ausgemessen werden. Mit allmählicher Erhöhung der Durchlassspan-

nung U_{EB} kommt der weiter oben beschriebene Transistoreffekt zur Wirkung und mit einem minimalen Bedarf an Basisstrom beginnt der Fluss der Majoritätsträger in Richtung Emitter - Kollektor. Schliesslich soll der Basisanschluss mit dem Kollektoranschluss verbunden werden. Im Vergleich zum vorangehenden Fall kann in den einzelnen Stromflüssen keine Veränderung festgestellt werden, der Transistor verbleibt unverändert im gesättigten Zustand und verhält sich schaltungstechnisch wie eine asymmetrische Diode erhöhter Leistung. In ihren physikalischen Parametern ist diese asymmetrische Diode völlig identisch mit den Eigenschaften der durch die Basis-Emitter-Schichten des Transistors verkörpert Diode, mit dem Unterschied, dass die Leistungsfähigkeit der Kollektor-Halbleiterschicht in die Basissschicht wesentlich geringerer Leistung transformiert wird. Da der Grad dieser Transformation mit dem Widerstand R_b geregelt werden kann, verhält sich der Transistor in dieser speziellen Betriebsart wie eine Hochleistungsdiode mit variierbarer Durchlassfähigkeit /Abb. 3b/. Beim Vertauschen der Polarisierung der Versorgungsspannung hört der Ladungsträgerstrom in Hauptrichtung auf und da der Wert der Versorgungsspannung nicht grösser ist als die maximal zulässige Basis-Emitter-Sperrspannung, kann im Transistor kein Ladungsträgerstrom in entgegengesetzter Richtung auf Grund des Lawineneffektes entstehen.

Auf diesen ausführlich beschriebenen Prinzip beruht die Arbeitsweise des erfundenen Wechselstromtransistors. Da herkömmliche Transistoren in Gleichspannungskreisen nicht nur im normalen, sondern - wenn auch mit kleinerem Wirkungsgrad -

im inversen Betrieb verwendet werden können, besteht aus physikalischer Sicht kein Hindernis dafür, den Transistor einer Wechselspannungsbelastung auszusetzen. Diese Wechselbelastung stellt nichts anderes dar, als eine sich periodisch wiederholende Beanspruchung in normaler und inverser Richtung. Damit die in Abb. 3/b dargestellten, stetig regelbare Leistungsdioden nicht nur in Gleich-, sondern auch in Wechselspannungskreisen erfolgreich eingesetzt werden kann, ist der Schichtaufbau zuvor symmetrisch zu gestalten. Dies ist erforderlich, da Wechselstrom keine definierte Polarität besitzt, so dass der Wechselstromtransistor sowohl von der Emitter- als auch von der Kollektorseite gleichermassen beanspruchbar sein muss. Wegen dieser wichtigen Bedingung sind herkömmliche Transistoren zur Wechselstromregelung nur in Einweg-Schaltungen einsetzbar und bei zweiseitiger Beanspruchung muss wegen des grossen Unterschiedes im Wirkungsgrad zwischen normalem und inversem Betrieb mit einer starken Signalverzerrung gerechnet werden. Nachteilig wirkt sich ausserdem die kleine Emitter-Basis-Sperrspannung aus, die mit ihrem Wert von 5 - 7 V zu einer starken Beschränkung der Anwendungsbereiche führt. Wichtigste Bedingung des erfundenen Wechselstromtransistors oder kurz AC-Transistors ist eine Struktur, bei der der Dotierungsgrad von Kollektor- und Emitterschicht im Interesse der Symmetrie gleich gross ist. Die Erfüllung dieser Bedingung bereitet technologisch keine besonderen Schwierigkeiten. Um den AC-Transistor jedoch auch bei höheren Spannungen einsetzen zu können, ist auf beiden Seiten die Sperrspannungsfestigkeit zu erhöhen. Diese Forderung widerspricht aber

dem bei Halbleitern erwünschten, möglichst kleinen Durchlasswiderstand und damit einem guten Wirkungsgrad, denn bei Erhöhung des Dotierungsgrades kommt es zur proportionalen Abnahme der Sperrspannungsfestigkeit der Übergänge. Zur Lösung dieses Problemes muss bei der Herstellung von AC-Transistoren ähnlich zu den psn-Dioden die epitaxiale Schichttechnologie angewendet werden, deren Wesen darin besteht, zwischen den stark dotierten Schichten und der Steuerschicht eine ~~dünne, schwach dotierte~~ Schicht mit der gleichen Kristallorientierung wie die stark dotierte Schicht aufzubringen. Diese schwach dotierten Schichten gewährleisten dann die gewünschte Durchschlagsfestigkeit zu den Steuer Elektroden. Da der Wechselstromtransistor - oder kurz ACT - über die Widerstände $R_1 - R_2$ in beiden Richtungen beanspruchbar ist, und die beiden Hauptelektroden wegen der Symmetrie beliebig vertauschbar sind, haben die Begriffe Kollektor- und Emitterschicht ihren Sinn verloren und diese Schichten werden im weiteren als Arbeitsschichten bezeichnet. Die Durchlassfähigkeit von AC-Transistoren kann ähnlich wie die zuvor beschriebenen Gleichspannungsdioden mit den Widerständen R_1 und R_2 stetig geregelt werden /Abb. 4a/. Die maximale Durchlassfähigkeit tritt bei dem Steuerwiderstand Null auf, d.h., wenn die Steuerelektrode direkt mit einer der Arbeits Elektroden verbunden wird. Da sich der Steuerstrombedarf des erfundenen Wechselstromtransistors genauso wie bei den herkömmlichen Transistoren aus dem Quotienten aus Arbeitsstrom zu Stromverstärkungsfaktor ergibt, wird durch Verringerung

der Steuerspannung und damit auch des Steuerstroms der ACT in den Sperrzustand gebracht. Vollständig gesperrt, d.h. unterbrochen ist er dann, wenn die Steuerspannung unter den Wert der Schwellspannung der eben in Durchlassrichtung betriebenen Steuer-Arbeits-Strecke fällt. Da die Sperrspannungen der Steuer- und Arbeitsschichten des Wechselstromtransistors symmetrisch sind und ihr Wert nicht kleiner sein kann als das Maximum der zu regelnden Wechselspannung, kann der ACT - ähnlich wie die Mehrschichtdioden - vorteilhaft als Hochleistungsschaltelement in Wechselstromkreisen eingesetzt werden. Seine Steuerung kann nicht nur vom Wechselstromnetz, sondern auch unter Einsatz eines weiteren ACT kleiner Leistung zur galvanischen Trennung von einer Gleichspannung erfolgen. Die hohen Steuergeschwindigkeiten werden noch durch die Tatsache unterstützt, dass der ACT im Gegensatz zu den Thyristoren, die nur durch Ausschalten des Hauptstromkreises unterbrochen werden können, durch einfaches Unterbrechen des Steuerkreises in einer beliebigen Phase der Wechselspannung ausschaltbar ist. Wie aus den Zeitdiagrammen auf Abb. 4/a ersichtlich ist, kann der AC-Transistor in dieser Form nur eine Halbperiode der Wechselspannung schalten und regeln, so dass in dieser Zusammenstellung zur gleichzeitigen Regelung beider Halbperioden eine auf Abb. 2 dargestellte Graetz-Gleichrichtereinheit verwendet werden muss. Eine Regelung beider Halbperioden mit einem ACT ist auch ohne Einsatz der Graetz-Schaltung möglich. In diesem Falle muss man jedoch eine komplizierte Steuereinheit verwenden, die dafür sorgt,

dass die Steuerelektrode entsprechend der Frequenz der Wechselspannung zwischen den Arbeitselektroden umgeschaltet wird.

Da der erfundene Wechselstromtransistor über die Widerstände R1 und R2 eine Selbstregelung verwirklicht, ist für den AC-Transistor im Gegensatz zu den Mehrschichtdioden kein kostspieliger Steuerstromkreis erforderlich. Wie auch aus der Abb. 4/a ersichtlich wird arbeitet der ACT nicht nach dem Phasenanschnittverfahren, sondern aufgrund der Amplitudenverringern, so dass in dieser Betriebsart die in der Technik der Mehrschichtdioden zwangsläufig angewendeten RLC-Elemente entfallen können.

Der ACT kann sowohl in npn- als auch pnp-Konfiguration hergestellt werden /Abb. 5b/. Die Abbildungen 5/a und 5/b enthalten für beide Varianten zwei zweckmässige symbolische Bezeichnungen.

Der erfundene Wechselstromtransistor kann - ähnlich wie die Doppel-Thyristortrioden - nicht zur stetigen Regelung pulsierender Gleichspannung, sondern auch für sich periodisch ändernde Wechselspannung eingesetzt werden /Abb. 4b/. Das

aus zwei ACT zusammengesetzte besitzt, wiederum im Vergleich zum Triac, den Vorteil, dass es eine automatische Selbstregelung verwirklicht. Ausserdem kann es, da eine Regelung nach der Amplitudenveringerung keine Signalverzerrungen verursacht, in der Schaltung nach Abb. 4/b als ein stetig regelbarer, elektronischer Transformator betrachtet werden. Die Spannungsstufe auf der Nulllinie der Übertragungscharakteristik wird durch die Schwellspannung des ACT hervorgerufen und ihr Wert beträgt maximal 1 V. Die Grundschaltungen und Bezeichnungen des elektronischen Transformators sind auf Abb. 6 dargestellt. Die Herstellungstechnologie des komplementären Wechselstromtransistors /C-ACT/ ist zwar komplizierter und damit teurer als die der äquivalenten Variante /E-ACT/, eine interessante Anwendungsmöglichkeit ergibt sich im Gegensatz zur stetigen Regelung mit äquivalenten Transistoren, da die Ansteuerung nicht nur mit einem Doppelpotentiometer /Tandempotentiometer/, sondern auch mit einem einzigem variablen Widerstand zwischen den beiden Steuerelektroden gelöst werden kann. Ausser der Einfachheit besitzt dieses Ansteuerverfahren den grossen Vorteil, dass es wesentlich weniger Steuerenergie erfordert.

Bei entsprechender Gestaltung sind die AC-Transistoren zusammengesetzten Schichtaufbaus erfolgreich beim Aufbau von Wechselstrom-Stromversorgungseinheiten /Transformatoren/ anwendbar. Ausserdem kann der erfundene Wechselstromtransistor auch als regelbares Gleichrichterelement eingesetzt werden. Auf Abb. 7 ist eine elektronisch transformierende und gleichrichtende Schaltung gezeigt, die unmittelbar vom Netz eine herab-

geregelter und gleichzeitig gleichgerichteter Spannung erzeugt. Ähnlich wie ein Graetz-Block kann diese Schaltung - unter Angabe der maximalen Eingangs-Wechselspannung und des maximalen Ausgangsstroms - in Form eines abgeschlossenen Sechspoles in einem Gehäuse hergestellt werden. Wenn man die externen Widerstände R_1 und R_2 dieser Schaltung mit je einem AC-Transistor kleiner Leistung ersetzt und die Steuerelektroden dieser Transistoren über einen einfachen Stromkreis zur Spannungsüberwachung im Ausgangskreis ansteuert, kann die mit dem erfundenen Wechselstromtransistor aufgebaute elektronische Transformator- und Gleichrichterschaltung leicht in einen Gleichspannungsstabilisator umgewandelt werden. Da wegen der vollelektronischen Ausführung mit der Schaltung nach Abb. 7 keine galvanische Trennung möglich ist, ist bei ihrer Anwendung auf den phasenrichtigen Anschluss zu achten. Dieses Problem tritt wegen der Vertauschbarkeit des Netzsteckers besonders bei tragbaren Geräten in Erscheinung, bei ausreichender Isolierung nach aussen jedoch ist für einen phasenrichtigen Anschluss nur bei Wartungsarbeiten zu sorgen. Bei Industrieanlagen verursacht das Fehlen der galvanischen Trennung keine Schwierigkeiten, da bei festen Anordnungen das Nullpotential eindeutig bestimmt werden kann. Da die erfundene elektronische Gleichrichter- und Transformatorschaltung auf Abb. 7 für positive Ausgangsspannungen entworfen wurde, sind für negative Ausgangsspannungen wegen der oben beschriebenen Unfallschutzmassnahmen die Schaltungselemente in ihrer Polarität zu vertauschen.

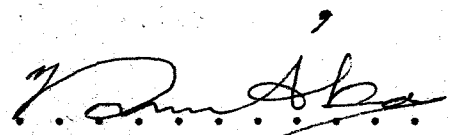
Der Wirkungsgrad des erfundenen Wechselstromtransistors ist umso grösser, desto kleiner die Differenz zwischen den Werten der Ein- und Ausgangsspannung ist. Mit der Erhöhung des Übersetzungsverhältnisses wachsen proportional die Wärmeverluste des ACT, die bei linearem Betrieb und starker Herabregelung den Einsatz unwirtschaftlich machen. Deshalb geht man bei einem Wirkungsgrad unter etwa 60 - 70% vom linearen Betrieb auf den bei Mehrschichtdioden angewendeten Schaltbetrieb über. Damit ist mit Hilfe des eingangs erwähnten Phasenanschnittverfahrens weiterhin ein wirtschaftlicher Wirkungsgrad des ACT auch bei grossen Übersetzungsverhältnissen gesichert. Da der ACT in dieser Betriebsart über einen Verzögerungsschaltkreis $0 - 180^\circ$ ebenfalls eine Selbstregelung verwirklicht, kann der Steuerstromkreis im Vergleich zu dem in der Mehrschichtdiodentechnik verwendeten Steuerstromkreis einfacher gestaltet werden.

Bei der Herstellung von AC-Transistoren auf Siliziumbasis sind wegen der symmetrischen Ausführung einige Modifizierungen erforderlich, die herstellungstechnologisch mit der traditionellen Epitaxial-Planar-Technologie übereinstimmen. Mit Hilfe dieser Halbleitertechnologie sind entsprechend der auftretenden Bedürfnisse Wechselstromtransistoren für verschiedene Sperrspannungen und Arbeitsströme als Varianten kleiner und grosser Leistungen herstellbar.

Patentansprüche:

1. Wechselstromtransistor, charakterisiert durch symmetrischen Schichtaufbau /1/ bipolaren Charakters und zweckmässige Symbolbezeichnung /2/.
2. Auf Abb. 5/a dargestellte Ausführungsform des in Punkt 1 bestimmten Wechselstromtransistors, charakterisiert durch symmetrischen npn-Schichtaufbau /1/ und zweckmässige Symbolbezeichnung /2/.
3. Auf Abb. 5/b dargestellte Ausführungsform des in Punkt 1 bestimmten Wechselstromtransistors, charakterisiert durch symmetrischen pnp-Schichtaufbau /1/ und zweckmässige Symbolbezeichnung /2/.
4. Auf Abb. 6/a dargestellte Ausführungsform des in Punkt 2 bestimmten Wechselstromtransistors, charakterisiert durch zusammengesetzten npn-Schichtaufbau /1/ und zweckmässige Symbolbezeichnung /2/.
5. Auf Abb. 6/b dargestellte Ausführungsform des in Punkt 3 bestimmten Wechselstromtransistors, charakterisiert durch zusammengesetzten pnp-Schichtaufbau /1/ und zweckmässige Symbolbezeichnung /2/.
6. Auf Abb. 6/c dargestellten Ausführungsform des in den Punkten 2 und 3 bestimmten Wechselstromtransistors, charakterisiert durch komplementären, zusammengesetzten Schichtaufbau /1/ und zweckmässige Symbolbezeichnung /2/.

7. Ausführungsform der in den Punkten 2 und 3 bestimmten Wechselstromtransistoren als regelbare Gleichrichterdiode, die mit Hilfe der Widerstände R_1 und R_2 /3/ - /4/ zur Einweg-Gleichrichtung von Wechselspannung und zur verzerrungsfreien Regelung der gleichgerichteten Spannung geeignet ist.
8. Ausführungsform der im Punkt 7 bestimmten regelbaren Gleichrichterdioden als Gleichrichterschaltung, die mit Hilfe der regelbaren pnp- und npn-Gleichrichterdioden /5/ - /6/ und der Dioden D_1 - D_2 /7/ - /8/ zur Zweiweg-Gleichrichtung von Wechselspannung und zur verzerrungsfreien Regelung der gleichgerichteten Spannung geeignet ist.
9. Ausführungsform der in den Punkten 4, 5 und 6 bestimmten Wechselstromtransistoren als elektronischer Transformator, der mit Hilfe der Widerstände R_1 und R_2 /3/ - /4/ zur verzerrungsfreien Regelung von Wechselspannung geeignet ist.


Ákos Kun

A u s z u g

Bei dem erfundenen Wechselstromtransistor handelt es sich um ein Halbleiterelement mit bipolarem Charakter, das zur stetigen, verzerrungsfreien Regelung und Hochleistungsschaltung elektrischer Wechselgrößen geeignet ist. Durch seinen einfachen Schichtaufbau ist der AC-Transistor frei von allen Nachteilen der in der Mehrschicht-Diodentechnik gebräuchlichen Thyristoren und Triacs. Aufgrund seiner speziellen Eigenschaften ist der Wechselstromtransistor auch als regelbare Gleichrichterdiode und elektronischer Transformator anwendbar.