

9 Mikrowellendioden

Die rasche Entwicklung auf dem Halbleitergebiet hat zunehmend den Einsatz von Halbleiterelementen auch in der Mikrowellentechnik ermöglicht. Sie besitzen gegenüber Mikrowellenröhren wesentliche Vorteile und ersetzen diese bei kleineren und mittleren Leistungen (≤ 100 W); sie haben außerdem der Mikrowellentechnik neue Anwendungsgebiete eröffnet. Zu diesen Vorzügen zählen der geringe Raumbedarf mit der Eignung für integrierte Schaltungen, die einfachere Niederspannungsversorgung, eine meist höhere Zuverlässigkeit und Lebensdauer, ein oft niedrigerer Preis und eine Unempfindlichkeit gegenüber starken Beschleunigungen. Sie verarbeiten aber nur kleinere und mittlere Leistungen. In diesem Abschnitt werden Halbleiterdioden behandelt.

Halbleiterdioden werden unter Ausnutzung der Spannungsabhängigkeit ihres Widerstands als Detektoren, in Mischern (Spitzen-, СНОТТКУ-, Backwarddioden), als Schalter (PIN-Dioden) und unter Heranziehung der Spannungsabhängigkeit ihrer Kapazität (Varaktordioden) in Reaktanzmischern, Reaktanzverstärkern, Frequenzvervielfachern und zur Frequenzabstimmung verwendet. Außerdem gibt es Dioden, die als aktive Zweipole zur Schwingungserzeugung und -verstärkung eingesetzt werden: Der in Verbindung mit dem Tunneleffekt auftretende negative differentielle Widerstand (Tunneldioden) wird zur Schwingungserzeugung und -verstärkung herangezogen, ebenso wie Laufzeiteffekte (Laufzeitdioden) und der Elektronentransfer (GUNNelemente).

Nach einer Betrachtung der Stromleitung in Halbleitern und der Physik des pn-Halbleiterübergangs werden die wichtigsten Vertreter der in der Mikrowellentechnik verwendeten Halbleiterdioden behandelt.

9.1 Eigen- und Störstellenleitung

Nach dem einfachen Grundmodell eines Atoms wird jeder Atomkern von Elektronen umkreist, in einer Anzahl, die gleich der Zahl der positiven Kernladungen ist. Elektronen können sich bei ihrem Umlauf um den Atomkern nur auf bestimmten diskreten Bahnen aufhalten, wobei der Bahnumfang ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge seiner Materiewelle ist (stehende Welle). Die Wellenlänge der Materiewelle eines Elektrons beträgt nach DE BROGLIE $\lambda = \hbar / (m \cdot v)$, $\hbar = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Ws = PLANKSches Wirkungsquantum, m und v sind Masse und Geschwindigkeit des Elektrons. Auf jeder dieser Umlaufbahnen weist ein Elektron eine charakteristische Gesamtenergie auf, die sich aus seiner kinetischen und potentiellen Energie zusammensetzt und auch als Energieterm bezeichnet wird. Diese Energie ist um so größer, je weiter entfernt vom Kern das Elektron kreist. Die Elektronen in einem solchen Atom können nur diskrete Energiewerte annehmen mit dazwischen liegenden Lücken des Energiebereichs, die nicht besetzt werden können. Beim absoluten Temperaturnullpunkt 0 K nehmen die Elektronen die energetisch günstigsten Lagen ein, sie besetzen die unteren kernnahen Niveaus mit den höchsten Bindungsener-

gien. Bei Zuführen äußerer Energie, zum Beispiel durch Erwärmung oder optische Bestrahlung, können Elektronen auf energetisch höhere unbesetzte Niveaus überwechseln. Sie hinterlassen damit an ihrem ursprünglichen Niveau einen unbesetzten Elektronenzustand, ein „Loch“ und beseitigen durch das Einnehmen des angeregten Zustands dort ein „Loch“.

In Festkörpern findet eine Verbiegung der Elektronenbahnen eines Atoms durch die elektromagnetischen Störfelder der Nachbaratome statt und damit eine Verschiebung der Energieterme. In Molekülstrukturen, in denen in eng benachbarten Atomen die äußeren Elektronen Bahnen um mehrere Kerne ausführen, spalten die einzelnen erlaubten Energieniveaus auf in mehrere solche Niveaus. So erhält das Schema der Elektronenterme infolge der Wechselwirkung zwischen benachbarten Atomen mehr erlaubte Energieniveaus als das der isoliert gedachten Atome. Bei kristallinen Festkörpern mit ihrer engen periodischen Anordnung sehr vieler gleichartiger Atome führt die immer weiter gehende Aufspaltung der Einzelniveaus zu kontinuierlichen Bereichen erlaubter Energiezustände, zu Energiebändern. Die zu den äußeren Bahnen gehörenden Energieterme entarten wegen der schwächeren Kopplung dieser Elektronen an den Kern zu breiteren Energiebändern. Die höheren Energieterme verschmieren zum Leitungsband. In ihm befindliche Elektronen können sich praktisch frei bewegen und bei Anliegen einer elektrischen Spannung am Kristall zur Stromleitung beitragen. Die Elektronen des Valenzbandes sind an die Atomkerne gebunden. Sie können aus ihrer festen Bindung nur gebrochen werden durch Energiezufuhr, wobei sie über die Energielücke des sogenannten „verbotenen Bandes“ zwischen Valenz- und Leitungsband mit nicht erlaubten Energiezuständen gehoben werden.

Die Energiezustände der Ladungsträger veranschaulicht man im Energiebändermodell (Darstellung $W = f$ (Abstand zum Atom) Bild 9.1), an Hand dessen man die Stromleitung in Festkörpern einfach darstellen kann.

Bei *Nichtleitern* (Isolatoren) ist die Bandlücke ΔW verbotener Energiezustände der Elektronen zwischen Valenzband und Leitungsband relativ groß. Sie beträgt beispielsweise bei Diamant 5 eV bei 0 K und 7,5 eV bei 300 K. Nichtleiter weisen praktisch keine Eigenleitung auf. Das Valenzband ist beim absoluten Temperaturnullpunkt 0 K vollständig mit Elektronen gefüllt (Bild 9.1a). Da hier keine unbesetzten Energiezustände verfügbar sind, in die Elektronen sich bewegen könnten, kann im Valenzband kein Stromtransport stattfinden. Auf der anderen Seite ist bei 0 K das Leitungsband von Elektronen unbesetzt, so dass auch hier kein Ladungsfluss geschehen kann.

Bei *Metallen* ist die äußere Elektronenschale nur teilweise mit Elektronen besetzt, die leicht abgegeben werden können. Sie stehen dann als freie Leitungselektronen („Elektronengas“) für den Stromtransport zur Verfügung und begründen die hohe elektrische Leitfähigkeit von Metallen. Valenzband und Leitungsband überlappen sich (Bild 9.1b), so dass keine thermische Anregung erforderlich ist, um Elektronen ins Leitungsband zu befördern, oder das Leitungsband ist nur teilweise gefüllt (Bild 9.1c). So können Elektronen unter dem Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes unbesetzte Energiezustände einnehmen und so zur Stromleitung beitragen.

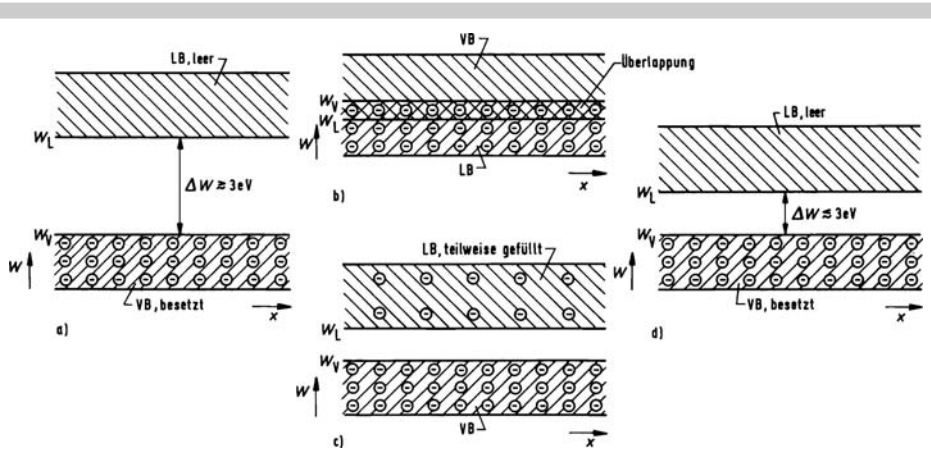


Bild 9.1:
Bänderschema (bei 0 K) für einen Isolator (a), Metall (b, c) und Halbleiter (d)

In *Halbleitern* mit Diamantgitter kann ein Elektron durch Zufuhr thermischer oder optischer Energie aus einer kovalenten Bindung gelöst werden und so als freies Elektron zu einer elektrischen Leitfähigkeit beitragen. Das Bänderschema bei 0 K ist grundsätzlich das gleiche wie beim Nichtleiter mit besetztem Valenzband und leerem Leitungsband, nur der Bandabstand ΔW ist viel kleiner (Bild 9.1d). Beim absoluten Nullpunkt der Temperatur kann also kein Stromtransport stattfinden. Mit Zunahme der Temperatur werden durch die thermische Energie im Kristallgitter Schwingungen angeregt. Reicht die zugeführte thermische Energie aus, um den Bandabstand zu überwinden, so werden Elektronenbindungen aufgebrochen, also Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband angehoben. Im Vergleich zu Metallkristallen geschieht diese Abtrennung von Elektronen bei Halbleiterkristallen viel seltener; aber gegenüber den Nichtleitern kann wegen des geringeren Bandabstands bei Zufuhr thermischer oder optischer Energie eine viel größere Anzahl von Elektronen zu einem Wechsel vom Valenzband über die Bandlücke hinweg zum Leitungsband angeregt werden; schon bei Zimmertemperatur befinden sich Elektronen im Leitungsband. Die zum Aufbrechen einer Gitterbindung erforderliche Arbeit ΔW (Bandabstand) beträgt bei Zimmertemperatur (300 K) für Silizium 1,12 eV und Galliumarsenid 1,43 eV (ΔW nimmt mit zunehmender Temperatur ab).

Bei dem Aufbrechen einer Gitterbindung entsteht jeweils ein Elektron-Loch-Paar mit einem freien Leitungselektron im Leitungsband und einem zurückbleibendem positiven „Loch“, das auch als „Defektelektron“ bezeichnet wird, im Valenzband. Auf den frei gewordenen Platz (Loch) kann ein Elektron eines Nachbaratoms nachrücken. Ein aus einer Gitterbindung ausgebrochenes Elektron diffundiert unter dem Einfluss seiner thermischen Energie in einer unregelmäßigen Bewegung, die durch die ständigen Stöße mit den Gitteratomen verursacht wird, durch den Kristall. Es tritt nach kurzer Zeit wieder in eine aufgebrochene Bindung ein. Man bezeichnet diesen Vorgang als Rekombination.

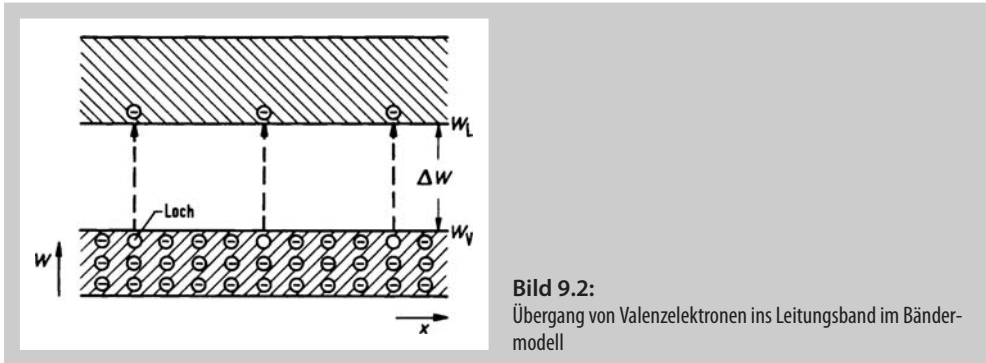


Bild 9.2:
Übergang von Valenzelektronen ins Leitungsband im Bändermodell

Durch das Springen von Elektronen auf freie Plätze wandern die freien Plätze, also die Löcher, weiter. Im Bändermodell (Bild 9.2) bedeutet dies eine Elektronenwanderung im Leitungsband und eine Löcherwanderung im Valenzband. Im Leitungsband ist die Zahl der unbesetzten Energiezustände im Vergleich zu der Anzahl der ins Leitungsband angehobenen Elektronen sehr groß, so dass sich diese dort frei durch unbesetzte Plätze bewegen und als Leitungselektronen zum Stromtransport beitragen können. Die Bewegung von Elektronen im Valenzband durch das Einnehmen von Loch-Plätzen kann betrachtet werden als die Bewegung der jeweils zurückbleibenden Löcher, die als positive Ladungsträger angesehen werden können.

Wird an den Halbleiter eine elektrische Spannung angelegt, so überlagert sich den ungerichteten Diffusionsbewegungen der Elektronen und Löcher eine Bewegung der Elektronen zur Anode und der Löcher zur Katode. Unter dem Einfluss des äußeren elektrischen Feldes wandern die Elektronen entgegen der Feldrichtung ($\vec{F} = -e\vec{E}$) durch den Halbleiter, indem die beim Aufbrechen von Bindungen frei werdenden Elektronenplätze jeweils durch nachrückende Elektronen von Nachbaratomen besetzt werden; man bezeichnet die so entstehende Leitung als *Elektronen- oder n-Leitung*. Die nicht besetzten Elektronenplätze (Löcher) wandern in der Feldrichtung durch den Kristall; man spricht hierbei von *Löcher- oder p-Leitung*. Die Wanderung der freien Elektronen und der Löcher begründen die (geringe) Eigenleitung des reinen Kristalls.

Man bezeichnet das der Betrachtung zugrunde liegende Halbleitermaterial mit Kristallen ohne Verunreinigungen und Fehlstellen als *intrinsisches* (intrinsic-) oder eigenleitendes Material und den in ihm möglichen Stromtransport als *Eigenleitung*. In einem solchen Material sind bei 0 K keine freien Ladungsträger vorhanden, da das Valenzband mit Elektronen voll besetzt und das Leitungsband leer ist. Bei Temperaturerhöhung sind die gebildeten Elektron-Loch-Paare die einzigen freien Ladungsträger. Da die Elektronen und Löcher jeweils paarweise gebildet werden und rekombinieren, ist die Elektronendichte n des Leitungsbandes gleich der Löcherdichte p im Valenzband. Somit gilt für intrinsisches Material

$$n = p = n_i; \quad (9.1)$$

n_i wird als *Inversionsdichte* bezeichnet.