

Wie funktioniert die Halbleiterdiode?

F. Herrmann u. P. Würfel

1 Einleitung

Halbleiterdioden werden in drei verschiedenen Funktionen eingesetzt: als Gleichrichter, als Lichtquellen und als photoelektrische Energiequellen. Wir stellen eine einfache Erklärung der Diode in ihren verschiedenen Funktionen vor. Es wird sich zeigen, dass man dazu die folgenden Zutaten nicht braucht:

- das Bändermodell,
- die Aufladung beiderseits der p-n-Grenzfläche,
- die Ladungsträgerverarmung in der Nähe der p-n-Grenzfläche.

Die Behandlung beschränkt sich auf die Darstellung der physikalischen Grundprinzipien. Sie ist auch Teil des Karlsruher Physikkurses [1]. Sie reicht nicht, wenn man etwa die Kennlinie der Diode herleiten oder den Wirkungsgrad berechnen möchte. Wer daran interessiert ist, sei auf die Fachliteratur verwiesen [2].

2 Bewegliche Ladungsträger in Halbleitern

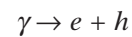
2.1 Die drei Stoffe e , h und γ

Ein Halbleitermaterial ist im Wesentlichen ein Nichtleiter. Die Elektronen befinden sich entweder auf inneren Schalen, fest an die zugehörigen Atomkerne gebunden, oder sie bilden, sofern es sich um die Valenzelektronen handelt, die vier kovalenten chemischen Bindungen zu den Nachbaratomen und sitzen damit auch fest. Falls Photonen vorhanden sind, kann ein solches Material eine gewisse Leitfähigkeit bekommen. Ein Photon geeigneter Energie kann nämlich ein Elektron aus seiner Bindung lösen. Das Elektron wird beweglich und trägt damit zur Leitfähigkeit des Materials bei. Außer dem beweglichen Elektron entsteht bei diesem Prozess noch ein anderer beweglicher Ladungsträger. Dort wo das Elektron hergenommen wurde, fehlt ein Elektron. Das bedeutet, dass ein Elektron aus einer Nachbarbindung in die Lücke springen kann. Dadurch wird die erste Lücke geschlossen, aber gleichzeitig entsteht eine neue Lücke. In anderen Worten: Auch das „Loch“, das fehlende Bindungselektron, kann sich im Material herumbewegen. Das ist äquivalent dazu, dass sich ein positiver Ladungsträger im Material herumbewegen kann. Man beachte, dass das Material bei dem Vorgang, den wir betrachtet haben, nicht elektrisch aufgeladen wird. Es werden lediglich Ladungsträger, die vorher unbeweglich waren, beweglich. (Man kann sich durchaus vorstellen, dass der nicht angeregte Halbleiter außer vielen unbeweglichen Elektronen auch viele unbewegliche Löcher enthält.)

Die beweglichen Ladungsträger unterscheiden sich nun so stark von den unbeweglichen, dass es zweckmäßig ist, sich

die beweglich gewordenen Ladungsträger als eine neue Teilchensorte vorzustellen. Und es ist dann nur konsequent, die beweglichen Elektronen und Löcher als die Teilchen von zwei Stoffen zu betrachten: dem e -Stoff und dem h -Stoff. Wir sprechen im Folgenden über diese Stoffe genauso wie man über die Stoffe der Chemie spricht. Es mag überraschen, dass man sich allein durch diese scheinbar unbedeutende Maßnahme die Einführung des Bändermodells erspart. Das Bändermodell ist dann implizit schon berücksichtigt.

Außer dem e -Stoff und dem h -Stoff ist noch ein dritter „Stoff“ im Spiel: Das Licht, also der Stoff, dessen Teilchen die Photonen sind. Der Vorgang, von dem gerade die Rede war, lässt sich mit den Symbolen der Chemie so beschreiben:



Diese Reaktionsgleichung sagt zum Beispiel: Aus einem Mol Licht entsteht ein Mol e -Stoff und ein Mol h -Stoff. Die Reaktion kann auch in die umgekehrte Richtung laufen: Aus e -Stoff und h -Stoff entsteht dann Licht. Unter „normalen“ Umständen herrscht aber chemisches Gleichgewicht:



γ ist in diesem Fall die thermische Umgebungsstrahlung. Dank der thermischen Umgebungsstrahlung enthält ein Halbleiter stets eine geringe Konzentration von e -Stoff und h -Stoff, also bewegliche Elektronen und bewegliche Löcher. Die damit verbundene Leitfähigkeit ist allerdings so gering, dass das Material praktisch noch ein Nichtleiter ist.

Man kann nun die Leitfähigkeit des Halbleitermaterials stark erhöhen, indem man es mit einem anderen Stoff „dotiert“, d. h. mit einer kleinen Konzentration dieses anderen Stoffes versieht.

Nehmen wir zunächst an, das Ausgangsmaterial sei das vierwertige Silizium. Dotiert man es mit dem fünfwertigen Arsen, so ist eines der Valenzelektronen jedes Arsenatoms nur noch sehr schwach gebunden. Bei Normaltemperatur spielt diese schwache Bindung keine Rolle mehr, so dass dieses Elektron beweglich ist. Das Material ist damit leitfähig geworden. Die Stoffmenge des e -Stoffs im „n-dotierten“ Silizium ist gleich der Stoffmenge des Arsens.

Ein ähnlicher Effekt tritt ein, wenn man das Silizium mit einem dreiwertigen Stoff „p-dotiert“, mit Bor zum Beispiel.

Tab. 1. Die Konzentrationen von e -Stoff und h -Stoff in undotiertem, n-dotiertem und p-dotiertem Silizium. Das Produkt $c_e \cdot c_h$ hat immer denselben Wert.

	c_e in cm^{-3}	c_h in cm^{-3}	$c_e \cdot c_h$ in cm^{-6}	
nicht dotiert	10^{10}	10^{10}	10^{20}	nicht leitfähig
n-dotiert	10^{17}	10^3	10^{20}	leitfähig für Elektronen
p-dotiert	10^3	10^{17}	10^{20}	leitfähig für Löcher

Jetzt *fehlt* ein Elektron, um die Bindungen zu den Nachbarn komplett zu machen. Mit sehr geringem Energieaufwand kann ein fehlendes Bindungselektron dadurch beschafft werden, dass von einer Nachbarbindung ein Elektron einspringt. Damit entsteht ein bewegliches Loch, und wieder wird das Silizium elektrisch leitfähig. Das mit Bor dotierte Silizium enthält *h*-Stoff. Die Stoffmenge des *h*-Stoffs ist gleich der Bor-Stoffmenge.

Während der Halbleiter im ersten Fall negativ geladene bewegliche Ladungsträger enthält, sind es im zweiten Fall positiv geladene. Auch hier wollen wir nicht vergessen: Das Silizium wird durch das Dotieren mit Arsen oder Bor nicht elektrisch geladen. Es wird nur leitfähig.

2.2 Das Massenwirkungsgesetz

Im chemischen Gleichgewicht entsteht im Mittel genau so häufig ein Photon aus einem Elektron-Loch-Paar, wie umgekehrt ein Elektron-Loch-Paar aus einem Photon. Nun hängt die Absorptionsrate der Photonen, und damit die Erzeugung von *e-h*-Paaren, nur von der Konzentration der Photonen in der Umgebungsstrahlung ab. Sie ist daher unabhängig von der Dotierung. Die Rate, mit der Elektronen und Löcher verschwinden (und Photonen entstehen), hängt dagegen von der Konzentration der Elektronen und der der Löcher ab. Genauer: Sie ist proportional zum *Produkt* der Konzentrationen von Elektronen und Löchern. Aus der Gleichheit der beiden Raten (Entstehung und Vernichtung von Elektron-Loch-Paaren) folgt, dass das Produkt der Konzentrationen von *e*- und *h*-Stoff konstant bleibt, wenn die Dotierung geändert wird:

$$c_e \cdot c_h = \text{const} \quad (2)$$

Verdoppelt man zum Beispiel (etwa durch Dotieren) die Konzentration des *e*-Stoffs, so halbiert sich die des *h*-Stoffs. Da die Umgebungsstrahlung temperaturabhängig ist, ändert sich der Wert des Produkts $c_e \cdot c_h$ mit der Temperatur. Der Chemiker erkennt in Beziehung (2) das Massenwirkungsgesetz.

Für Silizium hat das Produkt $c_e \cdot c_h$ bei 300 K etwa den Wert $10^{20}/\text{cm}^6$. (Als Maßeinheit der Konzentration nehmen wir Stück pro Kubikzentimeter.) Ist das Silizium nicht dotiert – weder mit Arsen noch mit Bor –, so müssen die Konzentrationen von *e*-Stoff und *h*-Stoff untereinander gleich sein. Damit das Produkt $10^{20}/\text{cm}^6$ beträgt, muss jeder der beiden Stoffe in einer Konzentration von $10^{10}/\text{cm}^3$ vorliegen, Tab. 1. Wenn das Silizium dagegen mit einer Konzentration von 10^{17} Atomen Arsen pro cm^3 dotiert ist, so enthält es auch 10^{17} bewegliche Elektronen pro cm^3 , und folglich nur noch 10^3 Löcher. Entsprechend ist es, wenn das Material p-dotiert ist.

2.3 Die Stoffleitfähigkeit

Als Physiker ist man es gewohnt, von *der* elektrischen Leitfähigkeit zu sprechen. Es kommt einem meist nur darauf an, ob ein Stoff bewegliche Ladungsträger enthält oder nicht. Man interessiert sich nicht dafür, welches die Ladungsträger sind. Enthält das Material viele bewegliche Ladungsträger, so ist es ein guter Leiter, enthält es nur wenige, so ist es ein schlechter Leiter.

Nun gibt es aber Phänomene, die man nur dann versteht, wenn man spezifiziert, welche Ladungsträger in einem gegebenen Material beweglich sind und welche nicht. Eine

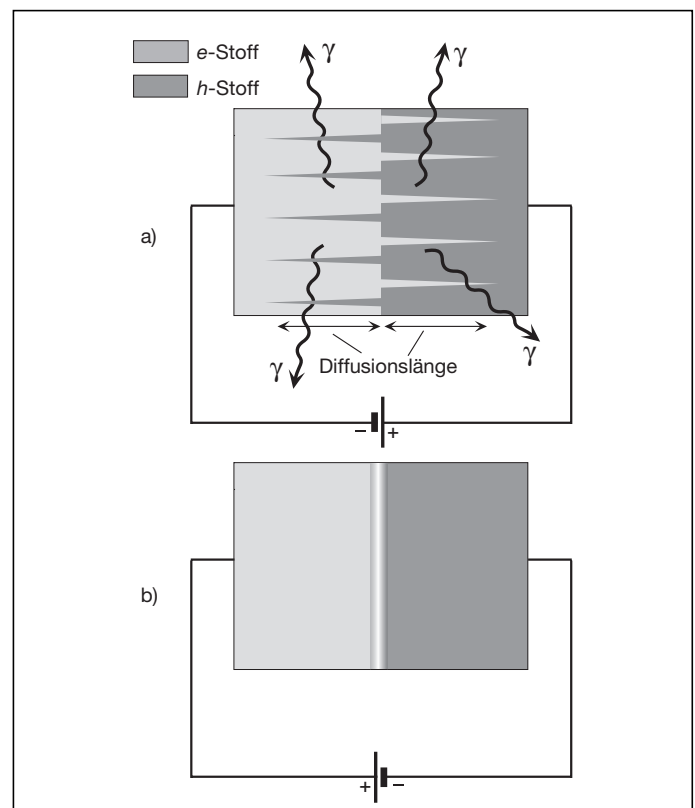
wichtige Rolle spielt diese Unterscheidung in der Elektrochemie. So nennt man einen Stoff einen Elektrolyten, wenn er leitfähig ist für Ionen und nicht leitfähig für Elektronen. Metallische „Leiter“ dagegen sind Leiter für Elektronen und (im Allgemeinen) Nichtleiter für Ionen. Auf diesem Unterschied in der *Stoffleitfähigkeit* beruht die Funktionsweise aller elektrochemischen Zellen.

Auch für die Funktionsweise der Halbleiterdiode spielen die Unterschiede in der Stoffleitfähigkeit für Elektronen und für Löcher eine entscheidende Rolle. n-dotiertes Material ist leitfähig für Elektronen und es ist ein Nichtleiter für Löcher, p-dotiertes Material ist leitfähig für Löcher und nichtleitend für Elektronen, Tab. 1. Wir betrachten ein Stück n-Material, das links und rechts geeignete Kontakte hat. Drückt man von links Elektronen in das Material hinein, so kommen sofort auf der rechten Seite Elektronen heraus. Dasselbe gilt für einen p-dotierten Halbleiter. Das Verhalten ist dasselbe wie bei einem mit Wasser gefüllten Rohr. Drückt man Wasser an der einen Seite hinein, so kommt an der anderen sofort Wasser heraus, obwohl das hineingedrückte Wasser noch längst nicht durch das Rohr hindurchgeflossen ist.

3 Die Halbleiterdiode als Gleichrichter und als Leuchtdiode

Nun zum Aufbau der Halbleiterdiode. Sie besteht aus zwei Bereichen. Der eine ist n-, der andere p-dotiert. Der eine enthält also *e*-Stoff, der andere *h*-Stoff. Außerdem hat sie am p- und am n-Teil je einen metallischen Kontakt. Wir schließen die Halbleiterdiode an eine Batterie an, und zwar zunächst in „Durchlassrichtung“, Abb. 1a. Die Ladungsträger im n- und p-Gebiet bewegen sich in entgegen-

Abb. 1: Halbleiterdiode in Durchlassrichtung (a) und in Sperrichtung gepolt (b)



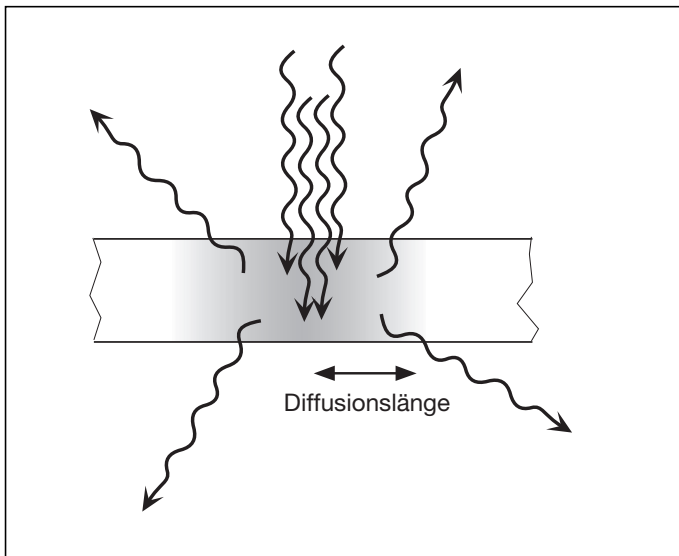


Abb. 2: Das Licht erzeugt im p-Material e - h -Paare. Dadurch nimmt die e -Konzentration am Ort der Einstrahlung stark zu. Zu den Seiten hin klingt sie auf einer Länge von etwa 0,1 mm ab. Dargestellt ist nur der e -Stoff.

gesetzte Richtungen: Der e -Stoff nach rechts und der h -Stoff nach links. Betrachten wir nun, was in der Nähe der p-n-Kontaktfläche passiert. Von links, vom n-Gebiet her fließen Elektronen über die Grenze hinweg ins p-Gebiet hinein. Dadurch nimmt die e -Konzentration im p-Gebiet im Vergleich zu ihrem Gleichgewichtswert zu. Das bedeutet, dass das chemische Gleichgewicht der Reaktion (1) im p-Gebiet gestört wird. Wir bekommen einen Nettoreaktionsumsatz, der mit der Produktion von Licht und dem Verschwinden von e - und h -Stoff verbunden ist:



Das Entsprechende passiert mit dem h -Stoff, der vom p-Gebiet über die Grenzfläche ins n-Gebiet strömt. Auch dort wird das chemische Gleichgewicht gestört, und auch dort wird gemäß Reaktion (3) Licht produziert.

Polt man die Diode um, Abb. 1b, so kann der elektrische Strom nicht mehr fließen. Es müssten ja dazu Ladungsträger von der Kontaktfläche aus wegfließen. Da von dort her aber keine Ladungsträger nachgeliefert werden, können auch keine abfließen. Genauer gesagt: fast keine. Schließlich produziert die Umgebungsstrahlung pro Sekunde eine gewisse, kleine Menge von e - h -Paaren. Diese geringe Nachlieferung ist verantwortlich für den *Sperrstrom*.

Wir kehren noch einmal zur Durchlasspolung zurück. Interessant ist die Frage, an welcher Stelle Reaktion (3) abläuft. Man könnte denken, die ins p-Gebiet einströmenden Elektronen reagieren sofort, d.h. sobald sie die n-p-Grenzfläche überschritten haben, und ebenso die Löcher, die ins n-Gebiet einströmen. Tatsächlich ist das aber nicht der Fall. Der Grund dafür ist, dass Reaktion (3) recht stark gehemmt ist.

Was bedeutet das? Damit eine chemische Reaktion laufen kann, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: Es muss ein Reaktionsantrieb vorliegen (das chemische Potenzial der Edukte muss höher sein als das der Produkte) und der Reaktionswiderstand darf nicht zu hoch sein. (Als Physiker wissen wir, dass analoge Bedingungen erfüllt sein müssen, damit ein elektrischer Strom fließt: Erstens bedarf es einer Spannung, und zweitens darf der Widerstand nicht zu hoch sein.) Ein einfaches Beispiel für eine stark gehemmte Reaktion ist die Verbrennung von Wasserstoff. Obwohl die Reaktion $2 \text{H}_2 +$

$\text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$ einen starken Reaktionsantrieb hat, kann man den Wasserstoff zusammen mit dem Sauerstoff in einem Behälter aufbewahren, ohne dass die Reaktion merklich laufen würde, denn der Reaktionswiderstand ist sehr hoch. (Man kann ihn vermindern mit Hilfe eines Katalysators oder durch Erhöhen der Temperatur.) So groß wie in diesem Beispiel ist der Widerstand der Reaktion (3) zwar nicht. Immerhin können die Elektronen aber weit ins p-Material eindringen, bevor sie unter Lichtemission mit Löchern reagieren. Die im Mittel durchlaufene Strecke, die *Diffusionslänge* der Elektronen, beträgt in Silizium etwa 0,1 mm. Sie sagt uns, welcher Bereich in der Umgebung der Kontaktfläche für das Funktionieren der Diode zuständig ist. In dieser *Diffusionszone* geschieht bei der Leuchtdiode die Emission von Licht¹⁾. Beim Photoelement treibt das in der Diffusionszone absorbierte Licht den elektrischen Strom an.

4 Die Halbleiterdiode als Photoelement

Um das Photoelement zu verstehen, müssen wir zunächst ein noch einfacheres Gebilde untersuchen. Was passiert, wenn man eine Stelle eines reinen p-Leiters mit einem feinen Lichtstrahl beleuchtet?

Wir stellen uns vor, wir könnten den Ablauf in Zeitlupe beobachten, unmittelbar nachdem das Licht eingeschaltet wurde, Abb. 2. Mit dem Einschalten des Lichts beginnt im Halbleitermaterial die Produktion von Paaren beweglicher Elektronen und Löcher. Wir haben also eine e - h -Paarquelle. Wäre das Material sowohl für Elektronen, als auch für Löcher leitfähig, so würden beide Ladungsträgersorten in die Umgebung abfließen. Die neu erzeugten Elektronen würden die schon vorhandenen Leitungselektronen wegdrücken, und die neu erzeugten Löcher würden die schon vorhandenen Löcher wegdrücken. Tatsächlich ist das Material aber für Elektronen nicht leitfähig. Daher stauen sich die neu erzeugten beweglichen Elektronen. Es entsteht ein Konzentrationsgefälle. Dieses stellt einen Antrieb für die Elektronen dar, der sie vom Produktionsort wegtreibt. Die Löcher könnten zwar viel leichter wegfließen als die Elektronen, da das Material für Löcher leitfähig ist. In dem Maße wie sie allein, d. h. ohne die entsprechenden Elektronen wegfließen, entsteht aber an der Stelle, von der sie wegfließen, eine negative elektrische Aufladung. Das zugehörige elektrische Potenzialgefälle bindet die Löcher an die beweglichen Elektronen: e - und h -Stoff werden elektrostatisch zusammengehalten. Die wenigen Elektronen diffundieren also vom Erzeugungsort nach außen, und die vielen Löcher verschieben sich ganz wenig (wobei die Teilchenstromstärken von Elektronen und Löchern gleich sind). Dabei reagieren Elektronen und Löcher gemäß Gleichung (3). Die Entfernung, die ein Elektron im Mittel zurücklegt bis es mit einem Loch reagiert, ist wieder gleich seiner Diffusionslänge. Wir fassen noch einmal zusammen: An der Stelle, wo das Licht auftrifft wird e - und h -Stoff produziert. Auf Grund des Konzentrationsgefälles strömen die Stoffe vom Erzeugungsort

¹⁾ In manchen Lehrbüchern wird behauptet, für den Gleichrichtereffekt sei ein an beweglichen Ladungsträgern verarmter Bereich beiderseits der Kontaktfläche zwischen p- und n-Gebiet verantwortlich. Tatsächlich ändert dieser Bereich, dessen Dicke bei Stromlosigkeit etwa 1/1000 der Diffusionslänge beträgt, seine Dicke mit der angelegten Spannung, so dass der Schluss plausibel scheint. Nun kann man aus der Korrelation zwischen zwei Effekten aber nicht schließen, dass der eine die Ursache des anderen ist. Wie es zu der Ladungsträgerverarmung kommt, sowie zu einer elektrischen Aufladung beiderseits des p-n-Kontakts, wird in Abschnitt 7.1 erläutert.

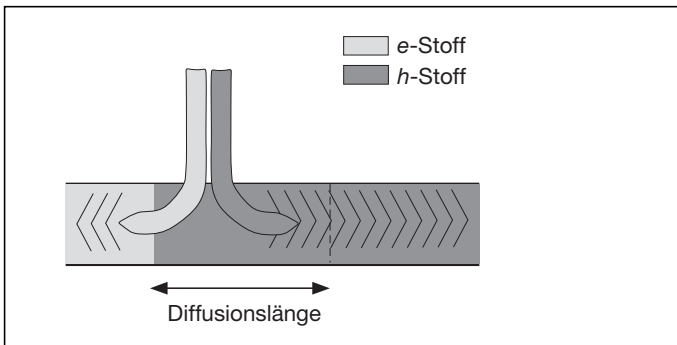


Abb. 3: Das einfallende Licht stellt eine Quelle für e - h -Paare dar. Hier wurde es ersetzt durch zwei Leitungen, durch die gleiche Mengen e - und h -Stoff zufließen. Sie haben den gleichen Effekt wie das Licht. Die Elektronen können nur nach links, die Löcher nur nach rechts abfließen.

weg. Innerhalb einer Diffusionslänge entsteht aus dem e -Stoff und dem h -Stoff wieder Licht.

Aus der Vorrichtung von Abb. 2 wird nun dadurch ein Photoelement, dass man das Lichtbündel nicht irgendwo mitten im p -Gebiet einfallen lässt, sondern in der Nähe der p - n -Grenze. Genauer: In einem Abstand, der kleiner ist als die Diffusionslänge. Schicken wir also das Lichtbündel an eine Stelle im p -Gebiet, die weniger als die Elektronendiffusionslänge von der p - n -Grenze entfernt ist. In Abb. 3 wurde der Lichtstrahl durch zwei Leitungen ersetzt, durch die gleiche Mengen e - und h -Stoff in das Halbleitermaterial hineingedrückt werden. Ein solcher Zufluss ist zur Produktion von e - h -Paaren durch Licht äquivalent. Was das Abfließen der Elektronen und Löcher betrifft, so gibt es jetzt keine Probleme mehr. Die Elektronen erreichen die p - n -Grenze und finden dort ein Gebiet mit einer hervorragenden Elektronenleitfähigkeit vor²⁾. Sie können also nach links abfließen. Die Löcher befinden sich von Anfang an in einem Gebiet, das gut löcherleitfähig ist. Sie können nach rechts abfließen, indem sie die vorhandenen beweglichen Löcher nach rechts drücken.

Wir hätten das Licht natürlich auch auf der n -Seite auftreffen lassen können. Wichtig ist nur, dass es innerhalb der Diffusionszone auftrifft. Tatsächlich lässt man bei einem realen Photoelement das Licht senkrecht zum p - n -Übergang auftreffen, sodass die ganze Diffusionszone mit Licht überflutet wird.

5 Versuch

Wir haben gesehen, dass eine Halbleiterdiode auf verschiedene Arten betrieben werden kann: Als Gleichrichter, als Lichtquelle und als elektrische Energiequelle. Je nachdem, wozu die Diode verwendet werden soll, unterscheidet sich die technische Realisierung. Diese Unterschiede sind aber für das Verständnis der Funktionsweise nicht wesentlich. Es empfiehlt sich daher, im Unterricht die drei Funktionen mit Hilfe ein und derselben Diode zu zeigen. Geeignet ist hierfür eine möglichst große rote Leuchtdiode. Man zeigt zunächst, dass der elektrische Strom in der Diode nur in einer Richtung fließen kann. Die Diode arbeitet als Gleichrichter. Ist die Diode in Durchlassrichtung gepolt, so offenbart sich natürlich auch ihre zweite

²⁾ Oft wird behauptet, für den Antrieb des elektrischen Stroms sei das elektrische Feld zuständig, das sich in unmittelbarer Umgebung der p - n -Grenzfläche befindet. Dass ein solches Feld prinzipiell keinen Antrieb darstellen kann, wird in Abschnitt 7.2 gezeigt.

Funktion: Sie leuchtet. Man schließt sie dann direkt, d. h. ohne zusätzliche elektrische Energiequelle, an ein Voltmeter mit einem hohen Innenwiderstand an. Hält man die Diode ins Licht, so zeigt das Voltmeter eine Spannung von über 1 V an. (Wegen der Winzigkeit der Diode ist der Kurzschlussstrom allerdings sehr gering.)

6 Zusammenfassung

Die Halbleiterdiode im Dunkeln ist in einer Richtung durchlässiger als in der anderen wegen der Unsymmetrie der Reaktion $\gamma \rightleftharpoons e + h$. Erzeugtes Licht entkommt zwar leicht, aber zur e - h -Erzeugung notwendiges Licht wird nur begrenzt nachgeliefert.

Der Antrieb des elektrischen Ladungsträgerstroms in einer Solarzelle ist ein Konzentrationsüberschuss von e - h -Paaren, der durch das Licht hervorgerufen wird. Die Ladungsträger fließen in entgegengesetzte Richtungen ab, da das Material auf der einen Seite des p - n -Kontakts nur für Elektronen, auf der anderen nur für Löcher leitfähig ist. Die in entgegengesetzte Richtungen fließenden e - und h -Ströme verursachen einen durchgehenden elektrischen Strom.

7 Anhang

7.1 Aufladung und Ladungsträgerverarmung an der Kontaktfläche

Wir interessieren uns für den Zustand des Materials in der Nähe der Kontaktfläche eines p - n -Übergangs. Wir formulieren zunächst als Behauptung, was dann bestätigt werden wird:

- 1 Beiderseits der Berührungsfläche entsteht eine elektrische Aufladung: Eine Ladungsverteilung ähnlich wie bei einem geladenen Kondensator.
- 2 Die Umgebung der Berührungsfläche ist an beweglichen Ladungsträgern stark verarmt.

Wie kommt es zu diesen Erscheinungen? Wir bringen in Gedanken ein Stück n -Material und ein Stück p -Material in Kontakt, und wir betrachten die Vorgänge, die unmittelbar nach dem Zeitpunkt des Berührens ablaufen, in Zeitlupe. Wir betrachten zunächst den e -Stoff, der sich, wie in Abb. 1, links befindet. Auf Grund des starken Konzentrationsgefälles zwischen n - und p -Gebiet beginnt der e -Stoff von links (hohe Konzentration) nach rechts (niedrige Konzentration) zu fließen. Das Konzentrationsgefälle stellt einen *Antrieb* für diesen Strom dar. Wenn es sich um ein normales, neutrales Gas handelte, würde dieser Vorgang so lange laufen, bis sich die Konzentrationen ausgeglichen haben. In unserem Fall ist es anders, denn die Elektronen sind elektrisch geladen. Wenn e -Stoff von links nach rechts fließt, so wird die vorher herrschende Neutralität gestört. Ein Gebiet links von der Grenze lädt sich positiv auf, ein Bereich rechts davon negativ. Damit entsteht ein elektrisches Potenzialgefälle, das als Antrieb für die beweglichen Elektronen in die andere Richtung, d. h. nach links wirkt. Das elektrische Potenzialgefälle wird größer und größer bis sich die beiden Antriebe – Konzentrationsgefälle nach rechts, elektrisches Potenzialgefälle nach links – aufheben. Es herrscht überall *elektrochemisches Gleichgewicht*. Tatsächlich geschieht das Einstellen dieses Gleichgewichts in einer sehr kurzen Zeit.

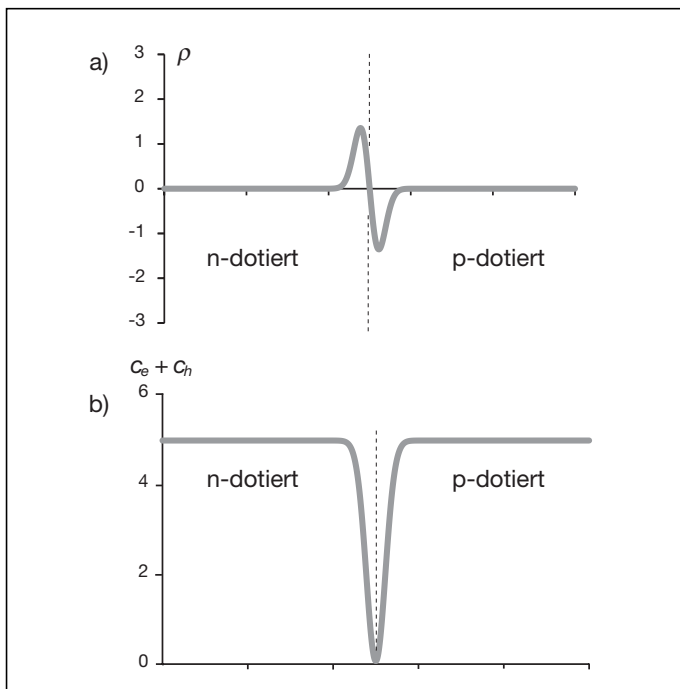


Abb. 4: (a) Ladungsdichte als Funktion der Ortskoordinate. (b) Konzentration der beweglichen Ladungsträger als Funktion der Ortskoordinate

Das Entsprechende passiert mit den Löchern. Auch sie fließen vom Material, in dem sie die hohe Konzentration haben, in dasjenige wo die Konzentration gering ist. Sie fließen also von rechts nach links. Auch das trägt bei zur positiven Aufladung links und zur negativen rechts.

Nebenbei sei erwähnt, dass eine solche Aufladung beiderseits der Grenzfläche mit dem zugehörigen Sprung im elektrischen Potenzial keineswegs eine Besonderheit eines p-n-Kontakts ist. Die Erscheinung ist an jedem Kontakt von zwei chemisch unterschiedlichen Materialien zu beobachten, seien es Metalle, Halbleiter oder Nichtleiter. So tritt sie auch in jedem elektrischen Stromkreis überall dort auf, wo das Leitermaterial wechselt: Bei jedem Übergang zwischen Kupferdraht, Silberkontakt, Aluminiumleiterbahn, Lötzinn usw. Man merkt davon allerdings gewöhnlich nichts, denn wenn man in einem geschlossenen Stromkreis einmal im Kreis herum geht, so geht man zwangsläufig diese Potenzialstufen genauso oft hinauf wie hinunter, so dass sie auf die elektrischen Phänomene keinen Einfluss haben. Man sieht, dass eine elektrische Potenzialdifferenz nicht zwangsläufig einen Antrieb eines elektrischen Stroms darstellt, ja dass im Gegenteil jeder Stromkreis elektrische Potenzialgradienten enthält, die dafür sorgen, dass kein elektrischer Strom fließt.

Die Dicke der Ladungsdoppelschicht hängt von der Konzentration der beweglichen Ladungsträger im Material ab. In Metall-Kontakten beträgt sie nur eine einzige Atomlage. Bei einem Halbleiterkontakt, wie wir ihn hier betrachten, ist eine typische Dicke $0,1 \mu\text{m}$. Das sind etwa 1000 Atomlagen, und es ist in Silizium etwa $1/1000$ der Diffusionslänge.

Nachdem wir uns bisher für die elektrische Aufladung in der Umgebung der Kontaktfläche interessiert haben, wollen wir noch nach den Teilchenkonzentrationen fragen. In den elektrisch geladenen Bereichen geht die Konzentration der Stoffe e und h von ihrem hohen Wert auf der einen Seite auf den niedrigen auf der anderen Seite über. Wenn man von links nach rechts geht, also vom n- ins p-Gebiet, so nimmt die Konzentration des e -Stoffs von ihrem hohen Wert, also z. B. $10^{17}/\text{cm}^3$ auf den niedrigen, z. B. $10^3/\text{cm}^3$ ab. Die h -Stoff-Konzentration nimmt entsprechend zu. Daraus

folgt, dass es eine Stelle geben muss, wo die Konzentrationen von e -Stoff und h -Stoff gleich sind. Da für Silizium $c_e \cdot c_h = 10^{20}/\text{cm}^6$ ist, betragen dort die Konzentrationen $c_e = c_h = 10^{10}/\text{cm}^3$. Wir haben daher im Übergangsbereich einen Einbruch der Ladungsträgerkonzentration von $10^{17}/\text{cm}^3$ auf $2 \cdot 10^{10}/\text{cm}^3$, d. h. um mehr als 6 Zehnerpotenzen.

Abb. 4 zeigt die Ladungsdichte und die Gesamtladungsträgerkonzentration als Funktion der Ortskoordinate, wenn man vom n-Gebiet ins p-Gebiet geht.

7.2 Warum das elektrische Potenzialgefälle am p-n-Übergang nicht für den Antrieb des Stroms verantwortlich sein kann

Man findet, nicht nur in Schul-, sondern gelegentlich auch in Hochschulbüchern, die Behauptung, in einem Halbleiterphotoelement stelle der elektrische Potenzialgradient in der Ladungsdoppelschicht (Abschnitt 7.1) den Antrieb für den elektrischen Strom dar. Bei oberflächlicher Betrachtung erscheint die Behauptung plausibel. Der elektrische Strom, den das Photoelement verursacht, braucht einen Antrieb. Als Antrieb für einen elektrischen Ladungsstrom kennen wir Physiker das elektrische Feld, also ein elektrisches Potenzialgefälle. Ein solches existiert in der Photodiode, und es hat auch die für die Erklärung benötigte Richtung. Also, schließt man, wird es wohl dieses elektrische Potenzialgefälle sein, das für den Strom verantwortlich ist.

Tatsächlich kann der Antrieb für einen stationären elektrischen Strom gar nicht ein elektrisches Potenzialgefälle sein. Folgt man nämlich einem (positiven) Ladungsträger in dem Stromkreis auf seinem Weg „im Kreis herum“, so geht es gerade genauso viel „bergauf“ wie „bergab“. Da es nun im Verbraucherwiderstand den Potenzialberg hinunter geht, muss es in der Quelle netto bergauf gehen. Man erkennt eine elektrische Energiequelle gerade daran, dass das elektrische Potenzial am „Ladungsausgang“ höher ist als am „Ladungseingang“. Dass es innerhalb der Energiequelle zwischendurch auch nochmal den Potenzialberg hinab geht, ändert an dieser Feststellung nichts. Wir hatten ja in Abschnitt 7.1 gesehen, dass elektrische Potenzialsprünge beim Übergang von einem Leitermaterial zu einem anderen die Regel sind. Der Antrieb der Ladungsträger kann daher kein elektrischer Antrieb sein. Tatsächlich wird der Ladungsträgerstrom in Halbleiterphotoelementen, genauso wie in elektrochemischen Zellen durch ein Konzentrationsgefälle angetrieben. Die Solarzelle ist also ein naher Verwandter der gewöhnlichen chemischen Batterie. Auch beim Thermoelement wirkt nicht ein elektrisches Potenzialgefälle als Antrieb des elektrischen Stroms. In diesem Fall ist der Antrieb ein Temperaturgradient. Die einzige Möglichkeit, einen elektrischen Strom doch mit Hilfe eines elektrischen Feldes anzutreiben, besteht darin, dass man ein Rotationsfeld erzeugt, d. h. ein Feld mit geschlossenen Feldlinien. Man nutzt diese Methode bekanntlich beim Generator aus.

Literatur

- [1] F. Herrmann: Der Karlsruher Physikkurs, Band 3, AULIS Verlag, Köln, 1999
- [2] P. Würfel, Physik der Solarzellen, Spektrum Akademischer Verlag, 2. Auflage, Heidelberg, 2000

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe, Prof. Dr. Peter Würfel, Institut für Angewandte Physik, Universität, 76128 Karlsruhe