



Physikalisches Praktikum II

Bachelor Physikalische Technik: Lasertechnik
Prof. Dr. H.-Ch. Mertins, MSc. M. Gilbert

FK05 Solarzelle und Photowiderstand

(Pr_PhII_FK05_Solarzelle_7, 25.10.2015)

Name	Matr. Nr.	Gruppe	Team
1.			
2.			
Protokoll ist ok	O	Datum	Abtestat
Folgende Korrekturen nötig	O		

Hinweis

Lesen Sie die Versuchsanleitung (inkl. Versuchsdurchführung & Auswertung!) gründlich durch und machen sich mit den Begrifflichkeiten vertraut. Die Teilnahme am Praktikum erfordert das erfolgreiche Beantworten der Zulassungsfragen am Versuchstag (siehe Anleitung) oder alternativ eine kurze Vorstellung eines Themengebietes an der Tafel.

1. Ziel

Solarzellen und Photodioden sind wichtige Sensoren in der opto-elektronischen Messtechnik. Eine weitere wichtige Rolle spielen Solarzellen bei der Energiegewinnung aus Sonnenlicht und sind nach wie vor Forschungsgebiet der Photonik.

2 Theorie

Zur Erklärung der Funktionsweise von Solarzellen benötigen wir das Wissen über pn-Dioden (siehe Praktikum „Halbleiterdioden“) und das hier vorgestellte Bändermodell des Festkörpers.

2.1 Bändermodell

In einem freien Atom können die Elektronen sich nicht an beliebigen Orten aufhalten, sondern nur auf bestimmten Bahnen, genauer Orbitalen. Je nach Orbital nehmen sie ganz bestimmte (diskrete) Energie-werte an. Binden die freien Atome sich zu einen Festkörper, so geschieht das indem sie sich die Elek-tronen der äußeren Orbitale teilen. Diese Valenzelektronen tragen damit die chemische Bindung und können nicht mehr genau einem Atom zugeordnet werden. Damit ändert sich auch das Energieschema. Die ursprünglich „schmalen“ Energieniveaus eines Atoms verbreitern sich zu sog. Energiebändern im Festkörper. Die Elektronen in diesen Bändern besitzen also keine diskrete Energie, sondern können eine bestimmte kontinuierliche „Bandbreite“ an Energie einnehmen (Abb. 1). Zwischen den Bändern befinden sich Energielücken, d.h. diese Energiewerte dürfen die Elektronen nicht annehmen. Das Leitungsband (LB). ist das tiefste Band, das teilweise oder gar nicht besetzt ist. Das energetisch höchste vollbesetzte Band ist das Valenzband

(VB) (Abb. 1). In ihm sind im wesentlichen die an der chemi-schen Bindung beteiligten Elektronen angesiedelt. Zwischen VB und LB liegt die Bandlücke (E_g). Die Fermi-energie E_F liegt zwischen höchstem besetztem und nächst höheren un-besetzten Zustand. Metalle haben ein teilweise gefülltes LB, d.h. die Fer-mieenergie liegt im LB und trennt den besetzten vom unbesetzten Bereich (Abb. 1). Isolatoren haben ein leeres LB und ein gefülltes VB. Die Fermieenergie liegt dann genau in der Mitte der Bandlücke. Halbleiter haben bei tiefer Temperatur ein leeres LB, besitzen aber eine kleinere Bandlücke E_g als Isolatoren.

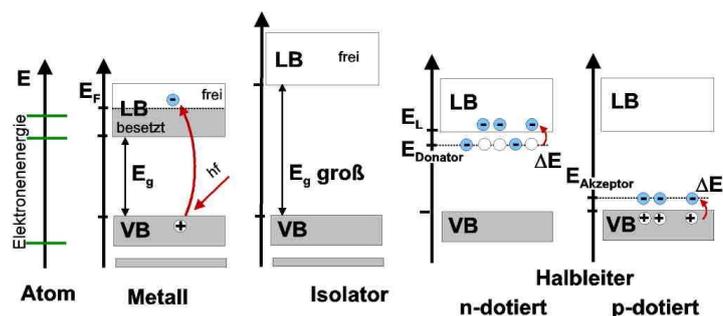


Abb. 1

Damit elektrische Leitung stattfinden kann, muß ein Elektron sich durch den Kristall bewegen. Dazu muss es kinetische Energie $E=eU$ aufnehmen können, die durch die angelegte Spannung U bereit

gestellt wird. Die Energieaufnahme ist aber nur dann möglich, wenn im Band auch um $\Delta E = eU$ höher liegende Zustände vorhanden sind. Bei Metallen mit dem nur teilweise besetzten LB ist dies möglich. Bei Isolatoren ist das wegen der in der Bandlücke fehlenden Zustände nicht möglich, d.h. ein Elektron aus dem oberen VB kann keine um $\Delta E = eU$ höhere Energie annehmen, da es sich sonst in der verbotenen Energielücke befinden würde. In der Regel ist $\Delta E = eU \ll E_g$, so dass ein Sprung in das unbesetzte LB auch unmöglich ist. Für die elektrische Leitung müssen also freie Plätze (Löcher) vorhanden sein, die das Elektron bei seiner Bewegung einnehmen kann. Dieses grobe Modell entspricht der Fahrt eines Autos über die Autobahn. Bei einem Stau sind alle Plätze der Autobahn belegt und „Autoleitung“ ist nicht möglich, d.h. sind alle möglichen Plätze eines Bandes mit Elektronen besetzt (volles VB), so kann es nicht zur elektrischen Leitung beitragen, denn es gibt keinen Platz (freie Energieniveaus) für zusätzliche, von „ausen“ kommende Elektronen. Ist ein Band unbesetzt, so gibt es auch hier keine freien, beweglichen Ladungsträger (leeres LB), d.h. befindet sich kein Auto auf der Autobahn, so gibt es auch keinen Autostrom. Nur teilweise mit Elektronen besetzte Bänder der Metalle ermöglichen elektrische Leitung.

Um auch für Isolatoren oder Halbleiter elektrische Leitfähigkeit herzustellen müssen durch thermische Energie oder Lichtabsorption Elektronen aus dem VB in das LB angeregt werden. Dies bedeutet, dass VB-Elektronen aus der chemischen Bindung „herausgerissen“ werden und damit quasi frei beweglich im LB sind. Valenzbandelektronen können aber nur dann über die Bandlücke in das LB angehoben werden, wenn die thermische oder Photonenenergie größer als die Bandlücke ist, also $hf > E_g$. Dann existieren im LB bewegliche Ladungsträger und im VB freie Plätze (Löcher). Beide tragen zum Stromtransport bei.

Wird der reine Festkörper (Kristall) mit Fremdatomen dotiert, so steigt seine Leitfähigkeit drastisch an. Diese Dotierungsatome stellen zusätzliche, durch geringe Energiezufuhr (Wärme) freisetzbare Ladungsträger zur Verfügung. Donatoren besitzen ein Elektron mehr als das Atom des Wirtskristalls. Dieses trägt zur Kristallbindung kaum bei und kann mit nur wenig Energie abgelöst und in das LB freigesetzt werden (n-Dotierung) (Abb. 1). Akzeptoren haben ein Elektron weniger und „akzeptieren gern“ ein zusätzliches Elektron um die Bindung im Kristall abzusättigen. Dieses erhalten sie bei geringer Energiezufuhr aus dem Valenzband (p-Dotierung, Abb. 1). Deshalb liegen die Energieniveaus der Donatoren und Akzeptoren auch in der Bandlücke, und zwar dicht unterhalb des LB ($\Delta E = E_L - E_{Donator}$) bzw. oberhalb des VB ($\Delta E = E_{Akzeptor} - E_V$). Typische Werte für ΔE liegen zwischen $10 - 100$ meV, d.h. etwa bei der thermischen Energie $kT = 25$ meV für Zimmertemperatur $T = 300$ K. Damit sind bei Zimmertemperatur nahezu alle zusätzlichen Ladungsträger der Dotierungsatome frei gesetzt, wodurch sich die Leitfähigkeit um $10^5 - 10^8$ verstärkt.

Halbleiterbandlücken liegen typischerweise zwischen 0,1 eV und 3 eV. Man kann ihren Wert durch Spektroskopie ermitteln, denn die Farbe eines Halbleiters ergibt sich aus der Größe seiner Bandlücke. Ist E_g kleiner als die Energie roten Lichtes $hf = 1,5$ eV (800 nm), werden alle Photonen mit $hf > E_g$, also das gesamte sichtbare Spektrum absorbiert und das Material erscheint schwarz, d.h. nicht transparent. Dies gilt erst recht für dotierte Halbleiter. Ist aber $E_g > 3$ eV (400 nm), so ist das Material für sichtbares Licht transparent, denn die Photonenenergie reicht nicht aus, um VB-Elektronen über die Bandlücke in das LB zu heben, die Photonen werden also nicht absorbiert (Umrechnung Wellenlänge –

Energie durch $E = 1240/\lambda$, Einheiten eV, nm). Liegt E_g dazwischen, so erscheint das Material in der Farbe, deren entsprechende Photonen nicht absorbiert werden.

2.2 Solarzelle

Photodioden und Solarzellen sind pn-Dioden (siehe Praktikum „pn-Dioden“), bei denen der Sperrstrom durch Lichteinstrahlung erhöht wird. Dazu müssen die Photonen im Bereich der pn-Grenzschicht einfallen und absorbiert werden. Absorption bedeutet, dass die Photonen ihre Energie an Elektronen abgeben indem sie dies aus dem Valenzband in das Leitungsband „anheben“, sofern Photonenenergie größer als die Bandlücke des Halbleiters ist, also

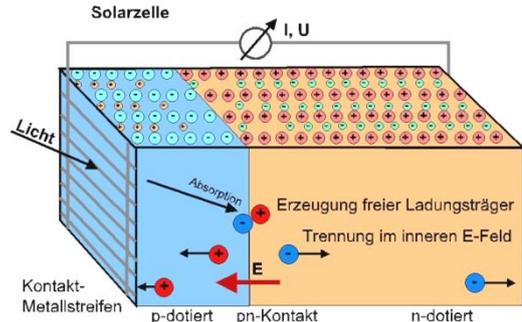


Abb. 2

$$(1) \quad hf > E_g$$

Damit stehen freie Ladungsträger zur Verfügung. Wichtig für die Funktion der Solarzelle ist der Ort der Absorption, d.h. die freien Ladungsträger (Elektronen und Löcher) müssen nah am pn-Kontakt erzeugt werden. Denn hier ist das innere E-Feld am stärksten (siehe Praktikum „Halbleiter-Diode“) und kann effektiv die Ladungsträger trennen und aus der Raumladungszone hinaus befördern (Abb. 2). Es fließt ein Strom, der Kurzschlußstrom $I_K = I(U=0)$, ohne dass eine Spannung außen angelegt werden muß! Ist kein Stromkreis vorhanden, so erhält man statt dessen eine Potenzialdifferenz, die Leerlaufspannung U_L , zwischen dem p- und n-dotierten Bereich. Merke: die treibende Kraft der Solarzelle ist also das innere elektrische Feld des pn-Kontaktes. Die Umwandlung von Sonnen- in elektrische Energie erfolgt durch das „Pumpen“ von Elektronen aus dem Valenz- in das Leitungsband wenn Photonen im Bereich des pn-Kontaktes absorbiert werden.

Der pn-Kontakt liegt bei den meisten Solarzellen großflächig und nah unter der Oberseite damit möglichst viele Photonen bis in die pn-Grenzschicht vordringen können und nicht schon vorher, d.h. außerhalb des inneren E-Feldes absorbiert werden. Der Arbeitsbereich der Solarzelle liegt im vierten Quadranten der Strom-Spannungskennlinie (Abb.3). Durch die Lichtabsorption wird die Zahl der den Sperrstromtragenden Ladungsträger deutlich erhöht. Der Sperrstrom, genauer der Kurzschlußstrom $I_K = I(U=0)$ steigt dabei proportional mit der Lichtleistung P_{op} . Somit eignet sich die Solarzelle zur quantitativen, linearen Messung der Lichtintensität. Die Leerlaufspannung $U_L = U(I=0)$ steigt dagegen nur mit dem Logarithmus von P_{op} , siehe Kennlinienschar in Abb. 3 Eine wichtige Kenngröße der Solarzelle ist der Füllfaktor

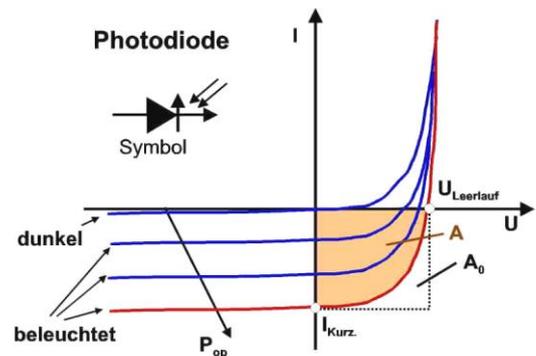


Abb. 3

$$(2) \quad FF = \frac{A}{A_0} = \frac{\int I dU}{U_L I_K}$$

der Auskunft über den Wirkungsgrad der Solarzelle gibt. Es ist das Verhältnis aus gewonnener elektrischer Energie zu eingestrahelter Lichtenergie. Er wird aus den beiden relevanten Flächen A und A_0 des vierten Quadranten im Strom-Spannungsdiagramm ermittelt. Kommerzielle Solarzellen sind dotierte Si-Halbleiter mit einem Wirkungsgrad von 15% - 20%, wobei an einer Erhöhung dieses Wertes gearbeitet wird.

Die Optimierung der Solarzelle bedeutet u.a. das Spektrum des einfallenden Sonnenlichtes möglichst vollständig auszunutzen, d.h. möglichst alle Photonen mit ihren verschiedenen Energiewerten zu absorbieren. Die entscheidende Größe hierbei ist die Bandlücke des Halbleitermaterials. Optimal wäre ein Material mit $E_g = 1.5 \text{ eV}$, Si besitzt 1 eV ist. Ein weiteres Optimierungsproblem ist der relativ hohe Anteil von erzeugten Elektronen und Löchern, die auf ihrem Weg von der pn-Grenzschicht zur Kontaktstelle rekombinieren und damit für den Stromfluß verloren gehen. Dies passiert vorzugsweise an Störstellen oder Verunreinigungen (Fremdatome) des Kristalls. Ideal wäre ein perfekter, großer „Einkristall“, der aber kaum bezahlbar ist.

2.3 Photowiderstand

Der Photowiderstand ist anders als die Solarzelle kein pn-Kontakt, sondern ein einfacher Halbleiter. Er wird, anders als die Solarzelle, nicht zur Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie eingesetzt, sondern zur Messung der Lichtintensität. Es ist meist ein einfacher Halbleiter, dessen elektrischer Widerstand bzw. die elektrische Leitfähigkeit $\sigma = ne\mu$ empfindlich von der eingestrahelten Lichtintensität abhängt (e : Elektronenladung, μ : Beweglichkeit). Dabei ist σ ein Maß für die Zahl n der freien Ladungsträger. Diese ist aber wiederum proportional zur Zahl der absorbierten Lichtquanten, also der Lichtintensität, wenn Elektronen aus dem VB in das LB angehoben werden. Um auch Infrarotlicht mit vergleichsweise geringer Photonenenergie $hf < E_g$ messen zu können, wird der Halbleiter dotiert. Die Absorption der Photonen erfolgt dann nicht durch Anheben der Elektronen aus dem Valenzband, sondern durch Transfer der Donatorelektronen in das Leitungsband, denn die Donatorzustände liegen meist dicht unter dem Leitungsband (Abb. 1). Ebenso können Elektronen aus dem Valenzband in dicht darüber liegende Akzeptorzustände durch geringe Photonenenergie angeregt werden.

Fragen Zulassung

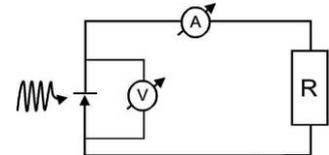
- Was sind Leitungsband, Valenzband eines Festkörpers?
- Was bedeutet Dotierung des Festkörpers?
- Wie unterscheiden sich Metall, Halbleiter und Isolator im Bändermodell?
- Wie ist eine Photodiode / Solarzelle aufgebaut?
- Wie sieht die Strom-Spannungskennlinie einer p-n-Diode aus?
- Worin unterscheidet sich der Photowiderstand von der Photodiode? Wie funktioniert er?

3. Durchführung

Solarzelle / Photodiode

- 3.0 Notieren Sie die Innenwiderstände von Volt- u. Amperemeter zur späteren Korrektur. Bleiben Sie bei den Messungen immer im selben Messbereich, da die Solarzelle keinen ohmschen Widerstand darstellt.
- 3.1 Nehmen Sie die Dunkelkennlinie $I(U)$ der Solarzelle auf (10 Messpunkte), indem Sie die Solarzelle abdunkeln und die Strom-Spannungswerte für Sperr- und Durchlassbereich messen ($I_{\max} = 200 \text{ mA}$!).

- 3.2 Nehmen Sie die Kennlinie $I(U)$ für den beleuchteten Zustand auf (5 Messpunkte). Setzen Sie dafür passende Widerstände ein.



Halten Sie die Leistung der Lampe und ihren Abstand zur Solarzelle dabei konstant. Bestimmen sie Kurzschlussstrom I_K , und Leerlaufspannung.

- 3.3 Messen Sie nur im Arbeitsbereich der Solarzelle (4. Quadrant Abb. 3) Nehmen Sie nur Kurzschlussstrom I_K und Leerlaufspannung U_L für 4 weitere Werte der Bestrahlungsstärke B der Solarzelle auf. Verändern Sie die Bestrahlungsstärke B , indem Sie den Abstand der Lampe zur Solarzelle verändern. Nutzen Sie dabei das Abstrahlungsgesetz $B(r) = B_0/r^2$.

Photowiderstand

- 3.4 Messen bei konstanter Bestrahlungsstärke die Strom-Spannungskurve $I(U)$ des Photowiderstandes.
- 3.5 Messen Sie den Photowiderstand R als Funktion der Bestrahlungsstärke entsprechend dem Vorgehen in 3.3. Beginnen Sie mit dem völlig abgedunkelten Photowiderstand. Messen Sie dazu bei konstanter Spannung den Strom als Funktion der Bestrahlungsstärke.

4 Auswertung

- 4.1 Beschreiben Sie kurz die Funktionsweise der Solarzelle.
- 4.2 Tragen Sie beide Kennlinien aus 3.1 und 3.2 in einem Diagramm ein und diskutieren Sie beide vergleichend. Nennen Sie Kurzschlussstrom I_K , Leerlaufspannung U_L und berechnen Sie den Füllfaktor FF .
- Korrigieren Sie vorher alle Werte mit den Innenwiderständen von Volt- u. Amperemeter.
- 4.3 Tragen Sie (Daten aus 3.3) I_K über der relativen Bestrahlungsstärke B/B_0 auf und prüfen Sie die Linearität.
- 4.4 Beschreiben Sie kurz die Funktionsweise des Photowiderstandes. Was ist der wesentliche Unterschied zur Solarzelle.
- 4.5 Tragen Sie die $I(U)$ Kurve (3.4) auf und bestimmen Sie den Photowiderstand R . Ist dies ein ohmscher Widerstand?
- 4.6 Tragen Sie aus den Daten von 3.5 den Strom und den elektrischen Widerstand als Funktion der normierten Bestrahlungsstärke auf.