

Übung 9

Diskussion am 21. Dezember 2023

1. Leitfähigkeit im Drudemodell, mit Temperaturkorrektur

- a) Leiten Sie, zur Übung bei zugeklappten Mitschriften/Endgeräten/Medien die Formel für die elektrische Leitfähigkeit nach dem Drude-Modell her:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}.$$

(m : Elektronenmasse, e : Elementarladung, τ : Stoßzeit, $n = \frac{ne}{V}$: Elektronendichte (in cm^{-3}))

- b) Wie und warum sinkt die Leitfähigkeit mit zunehmender Temperatur (kurze Begründung mit quantitativen Argumenten in max. 2-3 Sätzen)?

2. Fermienergie in ein-, zwei-, und dreidimensionalem Metall

- a) Wieviele Elektronen befinden sich in
- einem Silberdraht der Länge 1 mm und Durchmesser 1 Ångstrom (Atomdurchmesser)
 - einer quadratischen Silberschicht der Kantenlänge 1 mm und Dicke 1 Ångstrom
 - einem Silberwürfel der Kantenlänge 1 mm
- Die Elektronen-Dichte von Silber ist $6 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$.
- b) Benutzen Sie nun als Modell (abermals) den unendlich hohen Potentialkasten: Was ist die Quantenzahl n_{max} und Energie E_{max} des höchsten besetzten Zustands in jeder Dimension, wenn jeder Zustand mit zwei Elektronen besetzt ist? Berücksichtigen Sie hierzu jeweils nur Dimensionen die größer als der Atomdurchmesser sind.
- c) Was ist also die Fermienergie? (Vorsicht: Die Lösung ist einfach nach Kenntnis von E_{max} , aber nicht trivial) Vergleichen Sie mit dem tatsächlichen Wert für Silber.

... bitte wenden ...

3. Solarzelle, innerer Photoeffekt, Dotierung

a) Lesen Sie folgendenden Abschnitt aus *Dorn-Bader Physik Kursstufe*

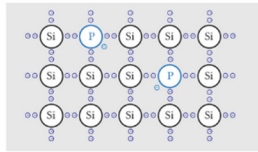
8.2 Innerer Photoeffekt



B1 Photoeffekt in Alltag: In einer Solaranlage auf dem Dach eines Wohnhauses wird die Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie umgewandelt.

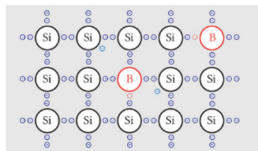
Photoeffekt in einer Solarzelle – Das grundsätzliche Prinzip des Photoeffekts ist nicht nur im Labor, sondern in leicht abgewandelter Form auch im Alltag anzutreffen. In **Solarzellen** (Bild **B1**) kommt es aufgrund von Lichteinstrahlung zur Ladungstrennung, die dann als Spannung zur Verfügung steht. Die vom Sonnenlicht gelieferte Energie wird so in elektrische Energie umgewandelt. Da die Elektronen aber nicht aus der Solarzelle austreten, spricht man hier vom **inneren Photoeffekt**. Der Hallwachs-Effekt, bei dem die Elektronen eine Metallplatte vollständig verlassen, wird analog dazu auch als **äußerer Photoeffekt** bezeichnet.

Halbleiter – Solarzellen bestehen aus **Halbleitern**, deren Leitfähigkeit von der Temperatur abhängt. Ein gängiges Beispiel für einen Halbleiter ist Silicium (Si). Im festen Siliciumkristall ordnen sich die Siliciumatome in einem Gitter an, in der jedes Atom vier weitere durch Elektronenpaarbindungen an sich bindet (Bild **B2**). Alle vier Valenzelektronen, die ein Si-Atom besitzt, sind damit als **Bindungselektronen** auf ihrer Position im Gitter fixiert und können diese nicht verlassen. Der Halbleiterkristall ist dadurch nicht elektrisch leitfähig, da sich keine Ladungsträger frei über diesen bewegen können. Wird ihm allerdings Energie (z. B. in Form von Wärme) zugeführt, lösen sich einzelne Bindungselektronen aus der geordneten Struktur und sind aufgrund des höheren Energieniveaus, das sie nun besitzen, in der Lage, sich frei im Halbleiter zu bewegen. Sie werden dadurch zu **Leitungselektronen**. Je mehr Energie zugeführt wird, desto mehr Bindungselektronen werden Leitungselektronen, wodurch die Leitfähigkeit des Halbleiters steigt. Es gibt allerdings auch eine Möglichkeit, die Leitfähigkeit des Halbleiters schon bei Raumtemperatur zu erhöhen.

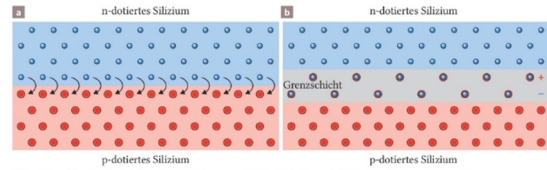


B2 n-Dotierung: Das fünfte Valenzelektron jedes Phosphor-Atoms kann in der Silicium-Struktur keine Bindung eingehen. Es wird zum Leitungselektron.

Dotierung – Beim Dotieren (lat. *dotare* = ausstatten) werden in einem Halbleiter z. B. Siliciumatome durch sogenannte **Fremdatome** (Atome anderer Elemente) ersetzt. Besitzen diese ein Valenzelektron mehr als Silicium (z. B. Phosphor (P)), spricht man von **n-Dotierung** (Bild **B2**), bei Atomen mit einem Valenzelektron weniger (z. B. Bor (B)) von **p-Dotierung** (Bild **B3**). In beiden Fällen wird der Halbleiter durch die Dotierung leitfähiger. Bild **B2** zeigt, dass im n-dotierten Halbleiter nun auch bei geringen Temperaturen freie Elektronen (Leitungselektronen) zu finden sind, die Ladung im Halbleiter transportieren können. Bild **B3** zeigt dagegen einen p-dotierten Halbleiter. Hier gibt es Lücken (sogenannte **Löcher**), an deren Stelle ein Platz für ein Bindungselektron nicht besetzt ist. Das ermöglicht es angrenzenden Bindungselektronen, auch ohne zusätzliche Energie an diese Stelle zu springen. Sie hinterlassen dann ein Loch an der Stelle, die sie zuvor besetzt haben, welches wiederum von anderen Bindungselektronen gefüllt werden kann usw. Auf diese Weise ist ebenfalls Ladungstransport im Halbleiter möglich.



B3 p-Dotierung: Da es nur drei Valenzelektronen besitzt, können die Bor-Atome nicht alle Plätze für Bindungselektronen besetzen. Es entsteht ein Loch.



B4 Aufbau einer Halbleiter-Solarzelle. a) Elektronen und Löcher diffundieren durch die Grenzfläche und rekombinieren. b) In der so entstandenen Grenzschicht gibt es weder Leitungselektronen noch Löcher.

Solarzelle – Eine Solarzelle besteht nun aus einer n-dotierten und einer p-dotierten Halbleiterschicht, deren Grenzfläche auch als **p-n-Übergang** bezeichnet wird. An diesem p-n-Übergang treffen Elektronen aus der n-dotierten Schicht auf Löcher aus der p-dotierten Schicht, da sie durch ihre Eigenbewegung durch die Grenzfläche diffundieren (Bild **B4a**). Fallen die Elektronen in die Löcher, so besetzt das Leitungselektron eine Stelle, die für ein Bindungselektron vorgesehen ist. Es wird dadurch selbst zu einem Bindungselektron. Zurück bleibt eine vollständige Elektronenpaarbindung. Dieser Vorgang, der nur in der direkten Umgebung der Grenzfläche auftritt, wird als **Rekombination** bezeichnet. Der Bereich, in dem nun weder Leitungselektronen noch Löcher vorliegen, heißt **Grenzschicht** (Bild **B4b**).

Innerer Photoeffekt – Trifft nun Sonnenlicht auf die Solarzelle, tritt der **innere Photoeffekt** auf. Die Elektronen in der Grenzschicht erhalten die Energie, die nötig ist, um die Löcher, mit denen sie dort rekombiniert haben, wieder zu verlassen. Sie werden wieder zu Leitungselektronen und fließen über die n-Schicht an ein Ende der Solarzelle, während die entstandenen Löcher über die p-Schicht zum anderen Ende wandern (**Exkurs**). Diese Ladungstrennung kann als Spannung abgegriffen werden, die elektrische Energie zur Verfügung stellt.

Wie beim äußeren Photoeffekt (Hallwachs-Effekt) erhalten also Elektronen durch Lichteinstrahlung Energie und können sich aus der Grenzschicht bewegen. Da die Elektronen den Halbleiter allerdings nicht verlassen, müssen die dafür benötigten Energiemengen größer sein als bei einer negativ geladenen Caesium-Platte. Nach der klassischen Physik würde man auch hier davon ausgehen, dass die Lichtwellen einem Bindungs-

elektron so lange Energie zufügen, bis es in der Lage ist, sein Loch zu verlassen. Durch **EINSTEINS** Lichtquantenhypothese wird allerdings klar, dass jedes Bindungselektron nur von einem **einzigsten** Photon Energie übertragen bekommt. Dies erklärt auch, wieso die Solarzelle nur mit Sonnenlicht und nicht mit dem Licht einer Taschenlampe betrieben werden kann. Wie beim äußeren Photoeffekt werden die nach $\Delta E_{ph} = h \cdot f$ energiereicheren UV-Photonen benötigt, um Bindungselektronen auf das höhere Energieniveau der Leitungselektronen zu heben.

Merksatz
Innerer Photoeffekt: In Halbleiter-Solarzellen erhalten Bindungselektronen Energie von Photonen aus dem Sonnenlicht. Sie werden aus ihrer festen Position in der Halbleiterstruktur gelöst und werden frei bewegliche Ladungsträger (Leitungselektronen).

Exkurs: Raumladungen in der Grenzschicht
Durch die Rekombination der Elektronen und Löcher in der Grenzschicht befindet sich dort nun ein Valenzelektron weniger in der Umgebung jedes Phosphor-Atoms. In der Umgebung jedes Bor-Atoms der Grenzschicht befindet sich dagegen ein Valenzelektron mehr. Dies führt zu Raumladungen in der Grenzschicht (Bild **B4b**). Die vom Sonnenlicht getrennten Elektronen und Löcher werden von diesen Raumladungen zu unterschiedlichen Seiten der Solarzelle beschleunigt und dadurch voneinander getrennt.

- Stellen sie (auch mithilfe einer Recherche z.B. in Büchern oder im Internet) Abbildungen B4a und B4b anhand eines Bändermodells (horizontale Achse: Ort entlang des p-n-Übergangs, vertikale Achse: Energie) dar. Zeichnen Sie darin auch die Fermienergie ein.
- Die Bandlücke in Silizium ist 1,12 eV. Wieviele p-n-Übergänge einer Fläche von ca. 200 cm² und Wirkungsgrad von 20% müssen Sie auf welche Weise (Skizze) verschalten, um die Standardspannung (40 V) und Leistung (ca. 400 W) eines heute gebräuchlichen Photovoltaikmoduls bei senkrecht einfallendem Licht einer Leistung von 1,4 kW/m² (Solarkonstante auf der Erde) zu erreichen?
- Berechnen Sie die Stromstärke, und vergleichen Sie damit die Anzahl der pro Sekunde fließenden Elektronen mit der Anzahl der auf die Solarzelle auftreffenden Photonen (benutzen Sie hierzu eine mittlere Wellenlänge von 550 nm).