

Lichttechnisches Institut

Karlsruher Institut für Technologie

Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer

Dipl.-Phys. Jan Mescher

M. Sc. Nico Bolse

Engesserstraße 13

76131 Karlsruhe

Festkörperelektronik

7. Übungsblatt

3. Juli 2014

Besprechung:

Übung 11. Juli 2014

Tutorien 14.-17. Juli 2014

Organisatorisches:

Bitte beachten Sie bei der Bearbeitung der Aufgaben nach wie vor die Markierungen, welche bereits auf dem 1. Übungsblatt erläutert wurden. Bereiten Sie die mit **Ü** markierten Aufgaben für die Saalübung und die mit **T** markierten Aufgaben für die Tutorien vor.



Abbildung 1: Wahlankündigung

1. Störstellenleitung vs. intrinsische Leitung (Ü)

Ein Halbleiter habe eine Bandlücke von $W_g = 1 \text{ eV}$. Elektronen und Löcher sollen eine effektive Masse gleich der freien Elektronenmasse haben. Der Halbleiter sei p-dotiert mit einer Akzeptorkonzentration von $p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Das Akzeptorniveau liege $0,065 \text{ eV}$ über dem Valenzband.

- Wie groß ist die Dichte der Löcher bei $T=300 \text{ K}$ (Die Lage des Fermi-niveaus kann aus Abbildung 2 abgeschätzt werden)? Vergleichen Sie diese mit der Dichte der Löcher in einem undotierten Halbleiter mit sonst gleichen Eigenschaften.
- Bestimmen Sie nun die Dichten der freien Elektronen für beide Fälle in a).
- Berechnen Sie die Leitfähigkeit σ bei $T=300 \text{ K}$ unter der Annahme einer Löcherbeweglichkeit von $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Die Beweglichkeit der Elektronen sei $1500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

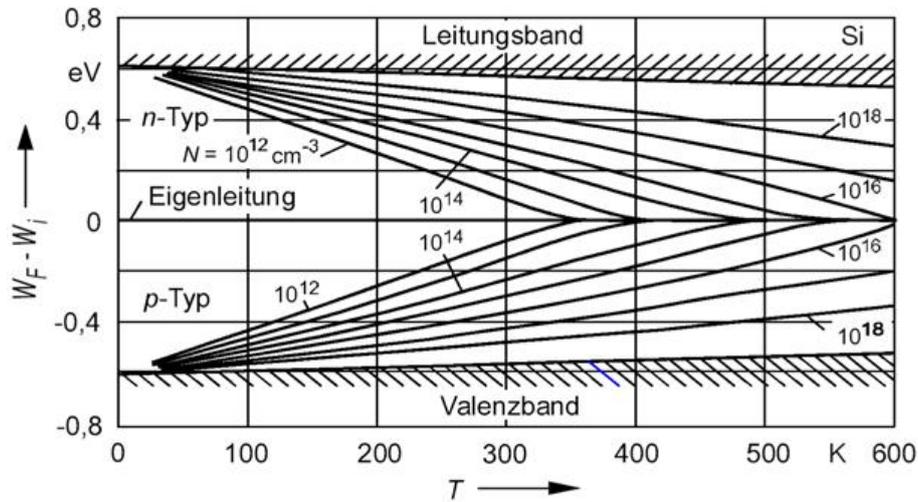
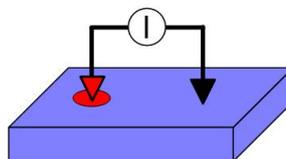


Abbildung 2: Fermienergie über Temperatur

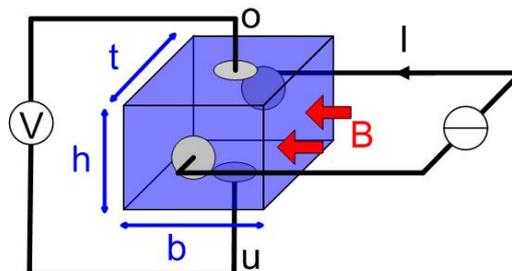
2. n oder p? (T)

Sie müssen die Dotierung in einem unbekanntem Halbleiterplättchen bestimmen.

- a) Ihnen steht die abgebildete Anordnung zur Verfügung. Das Messgerät besteht aus zwei Messspitzen und einem Amperemeter, das zwischen die beiden Messspitzen geschaltet werden kann. Eine der beiden Messspitzen kann erhitzt werden. Erläutern Sie, wie mit Hilfe dieser Apparatur bestimmt werden kann, wie die Halbleiterprobe dotiert ist.



- b) Zum gleichen Zweck kann eine Hall-Messung durchgeführt werden. Hierbei werden vier Kontakte an das Halbleiterplättchen angebracht. Durch die Kontaktierung an den Stirnflächen lässt man einen Strom fließen, senkrecht dazu kann die Spannung gemessen werden. Zu guter letzt wird noch ein Magnetfeld angelegt. Wie funktioniert die Bestimmung der Dotierung mit dieser Methode?



- c) Es fließe ein Strom durch die Stirnflächen und ein Magnetfeld sei angelegt. Leiten Sie einen Ausdruck für den Widerstand der Halbleiterprobe senkrecht zu Magnetfeld und Strom (zwischen den Anschlüssen o und u) her.

3. Photodioden (T)

Sie beleuchten einen Galliumarsenid-Kristall (direkter Halbleiter mit $W_g = 1,43$ eV bei Raumtemperatur) mit Licht.

- Können Sie infrarotes Licht mit einem solchen Kristall detektieren?
- Welchen Einfluß hat die Temperatur auf die Absorptions-Kurve?
- Sie bestrahlen den Kristall 100 fs lang mit rotem Licht der Wellenlänge 780 nm und der Pulsenergie 10 nJ. Wieviele Elektronen werden durch diesen Lichtpuls in das Leitungsband angeregt? Wegen der Kürze des Pulses können Diffusionsprozesse vernachlässigt werden.
- Sie wollen nun einen Detektor bauen, der 90 Prozent des einfallenden Lichts mit der Wellenlänge 618 nm auffängt. Wie dick muss der Detektor sein? Benutzen Sie Abbildung 3, um die Absorptionsdaten von GaAs zu ermitteln.

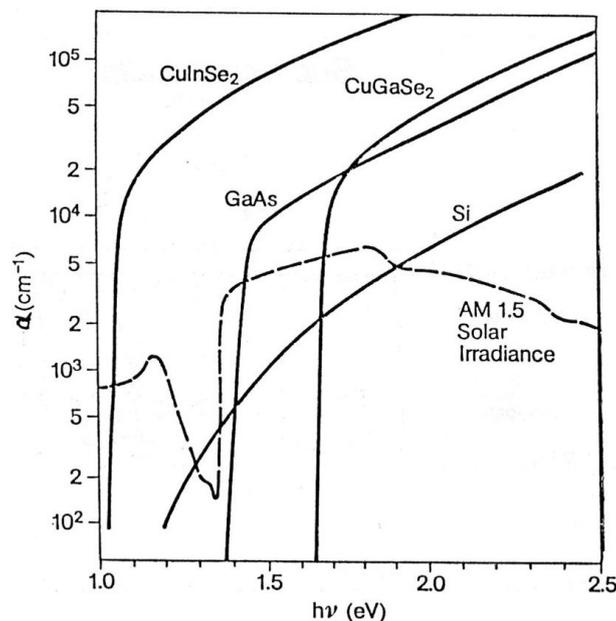


Abbildung 3: Absorption verschiedener Halbleiter

- Wie dick muss ein entsprechender Silizium-Detektor sein, um die gleiche Absorption zu erreichen?

4. Diffusion (T)

Ein Halbleiter-Stab vom p-Typ wird beleuchtet. Im ganzen Volumen des Halbleiters werden gleichmäßig mit der Rate g_L Ladungsträgerpaare erzeugt. Gleichzeitig werden an der Stelle $x = 0$, am Anfang des Stabes, Ladungsträger entzogen, was zu $\Delta n_p = 0$ bei $x = 0$ führt. In die positive x -Richtung kann der Stab als unendlich ausgedehnt angenommen werden. Bestimmen Sie $\Delta n_p(x)$ unter der Annahme, dass $\Delta n_p(x) \ll p_0$ und stationäre Bedingungen gelten.

5. Diffusionslänge (T)

In einem stark n-dotierten Halbleiter wird bei $T = 300$ K an der Stelle $x = 0$ eine Überschussladungsträgerdichte p_0 aufrecht erhalten. Die Lebensdauer der überschüssigen Ladungsträger betrage τ_p . Die Ladungsträger seien entsprechend

$$p(x) = p_0 \exp\left(-\frac{x}{L_D}\right)$$

verteilt. Bestimmen Sie mittels der Kontinuitätsgleichung den Zusammenhang zwischen der Diffusionslänge L_D und der Diffusionskonstante D_p . Warum muß $p(x)$ die angegebene Form haben? Berechnen Sie die Diffusionslänge L_D bei einer Beweglichkeit $\mu = 10^3 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ und einer Lebensdauer $\tau_p = 10^{-6}$ s.

6. Halbleiter unter Beleuchtung (Ü)

Wir betrachten einen stark p-dotierten Halbleiter-Quader der Dicke d . An der Oberseite wird er homogen mit Licht bestrahlt. Die einfallenden Photonen werden in einer im Vergleich zur Diffusionslänge sehr dünnen Schicht absorbiert. Wir befinden uns im Bereich der Störstellenerschöpfung.

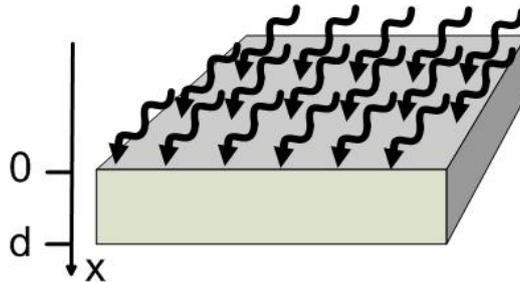


Abbildung 4: Absorption in einem Halbleiter der Dicke d

- Stellen Sie nun die Kontinuitätsgleichung und die Randbedingungen für die Überschusselektronen Δn auf und erklären Sie Ihr Vorgehen. Gehen Sie davon aus, dass an der Oberfläche eine konstante Überschussladungsträgerdichte aufrecht erhalten wird. An der Unterseite der Probe werden alle Überschussladungsträger abgesaugt. Im Halbleiter habe sich ein stationärer Zustand eingestellt. Gehen Sie von einer Rekombinationsrate $r = \Delta n / \tau_n$ aus.
- Lösen Sie allgemein die im letzten Aufgabenteil aufgestellte Gleichung und berechnen Sie nun die Überschusselektronendichte.
- Ein allgemeinerer Ausdruck für die Rekombinationsrate eines konstant beleuchteten Halbleiters habe die folgende Form:

$$r = \frac{np - n_i^2}{\tau_p n + \tau_n p}$$

Der Halbleiter sei stark n-dotiert. Weiterhin seien die Löcheranzahl und die Elektronenanzahl durch Photogeneration über die Gleichgewichtsanzahl im dotierten unbeleuchteten Halbleiter (n_{dot} und p_{dot}) auf n bzw. p erhöht, wobei $p \ll n_{dot}$ und $n \cong n_{dot}$ gelten soll. Vereinfachen Sie unter diesen Annahmen die Gleichung so weit wie möglich.

7. pn-Übergang (Ü)

Wir betrachten n- und p-dotiertes Silizium bei Raumtemperatur. Skizzieren Sie das Banddiagramm einschließlich Fermi-niveaus, wenn beide dotierten Halbleiter in Kontakt gebracht werden...

- a) ...ohne äußere Vorspannung.
- b) ...mit äußerer Vorspannung $+U_D$ (Diffusionsspannung) in Durchlassrichtung.