

Übungsblatt 4

Aufgabe 1) Driftstrom in einem dotierten Halbleiter

Wir betrachten ein Halbleiterstäbchen aus Silizium der Länge $l = 8 \mu\text{m}$. Die Stirnflächen haben die Dimensionen $3 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$. Der Halbleiter sei mit $2,5 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ Bor-Atomen und mit $2 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ Arsen-Atomen dotiert. Die effektive Masse der Elektronen und Löcher sei $0,33 \cdot m_0$ und $0,56 \cdot m_0$, wobei m_0 die freie Elektronenmasse ist. Es gilt Störstellenerschöpfung. Die Bandlücke ist $W_g = 1,12 \text{ eV}$, die Temperatur $T = 300 \text{ K}$.

- Bestimmen Sie die Ladungsträgerkonzentrationen für Elektronen und Löcher. Berechnen Sie dazu die äquivalenten Zustandsdichten und bestimmen Sie daraus n_i .
- Zeichnen Sie das Banddiagramm mit Fermi-Niveau und den Energieniveaus der Dotieratome. Steht die Lage des Fermi-Niveaus im Einklang mit der Annahme, dass Störstellenerschöpfung vorliegt? Begründen Sie Ihre Antwort. Entnehmen Sie die Werte für die Störstellenniveaus aus den Vorlesungsfolien.

Die Abhängigkeit der Ladungsträger-Driftgeschwindigkeit von der angelegten Feldstärke ist in Silizium gegeben durch die Beziehung

$$v_{n,p} = \frac{v_s}{\left[1 + (E_0 / E)^\gamma\right]^{1/\gamma}},$$

wobei die Sättigungsgeschwindigkeit $v_s = 1 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$ beträgt, sowie für Elektronen und Löcher jeweils gelten: $E_{0,n} = 7 \cdot 10^3 \text{ V/cm}$, $E_{0,p} = 2 \cdot 10^4 \text{ V/cm}$ und $\gamma_n = 2$, $\gamma_p = 1$.

- Berechnen Sie die Beweglichkeit der Elektronen und Löcher, also den Quotienten aus dem Betrag der Driftgeschwindigkeit und dem Betrag des elektrischen Feldes im Grenzfall kleiner Feldstärken.
- Es wird nun eine Spannung $U = 60 \text{ V}$ zwischen den Stirnflächen angelegt. Bestimmen Sie die Driftgeschwindigkeiten der Elektronen und Löcher. Prüfen Sie dabei, ob die Geschwindigkeiten sich in der Nähe der Sättigungsdriftgeschwindigkeiten bewegen.
- Welcher Gesamtstrom fließt durch das Stäbchen?

Aufgabe 2) Dynamik von Überschussladungsträgerdichten in Silizium

Ein nicht geerdetes n-dotiertes Silizium-Bauteil ($n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $n_D = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_p = 460 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) werde einmal kurz einem Lichtimpuls ausgesetzt. Der Lichtblitz generiert eine Überschusssträgerdichte von $n' = p' = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, welche sich gleichmäßig über das ganze Bauteil verteilt. Die Dauer des Lichtblitzes sei sehr kurz und ist zu vernachlässigen. Es gilt Störstellenerschöpfung.

- Handelt es sich hier um „schwache Injektion“ (*low-level injection*) oder „Hochinjektion“ (*high-level injection*)?
- Wie groß ist die relative Leitfähigkeitsänderung der Probe unmittelbar nach dem Lichtblitz? Geben Sie einen formalen Ausdruck sowie einen numerischen Wert an.

- c) Im Halbleiter werden zunächst spontane Prozesse betrachtet, die durch eine Netto-Rekombination $r_{sp} - g_{sp} = B \cdot n_n p_n - B \cdot n_i^2$ beschrieben werden. Zeigen Sie, dass das Abklingen der Überschussladungsträgerdichte im vorliegenden Fall durch eine Lebensdauer beschrieben werden kann in der Form $r_{sp} - g_{sp} = \frac{p'}{\tau_{sp}}$
- d) Der Halbleiter soll zusätzlich tiefe Störstellen aufweisen, über die Shockley-Read-Hall Rekombination stattfindet. In diesem Fall ist die Netto-Rekombinationsrate gegeben durch

$$r_t - g_t = \frac{n_n \cdot p_n - n_i^2}{(n_n + n'_{th})\tau_p + (p_n + p'_{th})\tau_n},$$

wobei die Hilfsgrößen n'_{th} und p'_{th} gegeben sind durch

$$n'_{th} = n_{th} \exp\left(\frac{W_T - W_F}{kT}\right) \text{ und } p'_{th} = p_{th} \exp\left(\frac{W_F - W_T}{kT}\right).$$

Vereinfachen Sie den Ausdruck für den vorliegenden Fall und unter der Annahme $W_F - W_T = 10kT$ und zeigen Sie, dass sich die Rekombinationsrate schreiben lässt als

$$r_t - g_t = \frac{p'}{\tau_{SRH}}, \text{ wobei } \tau_{SRH} = \tau_p \text{ ist. Nehmen Sie an, dass die Parameter } \tau_n \text{ und } \tau_p \text{ in der}$$

gleichen Größenordnung liegen.

- e) Schreiben Sie nun die Differentialgleichung auf, welche den zeitlichen Zerfall der Überschuss-Ladungsträgerkonzentration beschreibt und geben Sie die formale Lösung der Differentialgleichung an. Berücksichtigen Sie dabei sowohl nicht-strahlende (Shockley-Read-Hall, Lebensdauer τ_{SRH}) als auch strahlende Prozesse (spontane Emission, Lebensdauer τ_{sp}).
- f) Skizzieren Sie die Entwicklung der Überschuss-Ladungsträgerkonzentrationen in der Probe als Funktion der Zeit. Skizzieren Sie außerdem qualitativ den zeitlichen Verlauf der Überschuss-Ladungsträgerkonzentration für den Fall, dass ein zweiter Lichtblitz auf die Probe trifft, bevor die Überschussladungsträger abgeklungen sind.