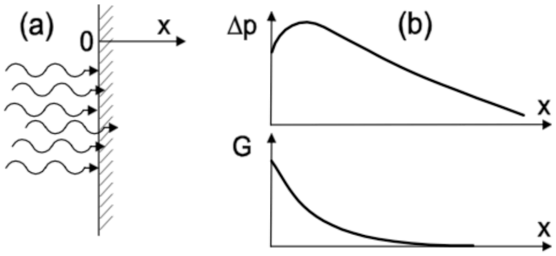
ÜBUNGSBLATT 7

Beispiel 25: (Diffusion):



Die Oberfläche von n-dotiertem Silizium wird mit Licht der Wellenlänge λ (Energie $h\nu$) und Intensität I_0 bestrahlt (siehe Abbildung (a)). Das Licht dringt typischerweise 1 μm tief in den Halbleiter ein. Unter der Annahme, dass jedes Photon ein Elektron-Loch-Paar erzeugt, ergibt sich für die Generationsrate folgender Ausdruck:

$$G(X) = \frac{\alpha I_0}{h\nu}\exp(-\alpha x) \qquad \alpha\text{….Absorptionskoeffizient}$$

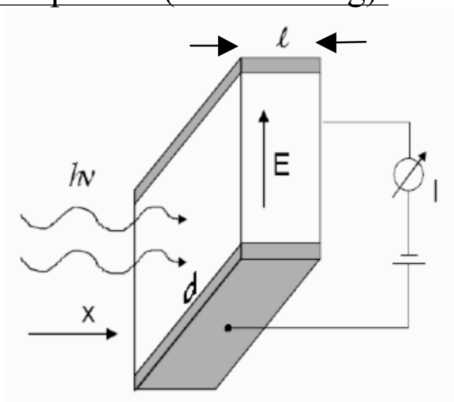
Aufgrund von Diffusion stellt sich in x-Richtung ein Minoritätenüberschuß $\Delta p(x)$ ein, wie er schematisch in Abbildung (b) dargestellt ist. Zeigen Sie, dass man für $\Delta p(x)$ folgende Gleichung erhält: $\Delta p(x) = \frac{\alpha\tau I_0}{h\nu\left(\alpha^2 L_p^2 - 1\right)}\left[\alpha L_p \exp(-x/L_p) - \exp(-\alpha x)\right]$ mit $L_p = \sqrt{D_p \tau}$.

Gehen Sie folgendermaßen vor:

(a) Leiten Sie aus der Kontinuitätsgleichung und aus der Gleichung für die Diffusionsstromdichte eine Differentialgleichung für den Löcherüberschuß $\Delta p(x)$ her! Die Lebensdauer der Löcher sei τ , d.h. die Rekombinationsrate beträgt: $R(x)=\Delta p(x)/\tau$.

(b) Lösen Sie die Differentialgleichung unter Verwendung der Randbedingungen: $\Delta p(x = \infty) = 0$ und $J_p\,(x = 0) = 0$.

Beispiel 26 (Photoleitung):



Die Oberfläche einer n-dotierten Halbleiterprobe der Elektronenkonzentration n_0 ($>>n_i$) (unbeleuchtet) werde permanent beleuchtet mit Licht der Wellenlänge λ und der Intensität I_0 bei senkrechtem Einfall (x-Richtung). Jede Interband-Absorption eines Photons (Absorptionskoeffizient α) erzeuge ein Elektron-Loch Paar. Die Diffusionskonstante der Elektronen bzw. Löcher sei $D_n=D_p=D$, ihre Rekombinationszeit τ. Senkrecht zur Einfallsrichtung werde nun ein elektrisches Feld E über die Breite d und Dicke l der Probe angelegt.

Verwenden Sie das Ergebnis aus Beispiel 27 um den durch die Photoanregung zusätzlich generierten Strom $\Delta i = i - i_0$ zu berechnen (i_0 …Dunkelstrom, d.h. Strom ohne Beleuchtung).

Zeigen Sie unter der Annahme $L_p << l << \alpha^{-1}$ dass $\frac{\Delta i}{i_0} = \frac{\tau}{h\nu n_0}\left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n}\right)\alpha I_0$,

Hinweis : $i = Ed\int_0^l \sigma(x)dx$

Beispiel 27 (Fermiverteilung und Quasi-Ferminiveaus)

Im thermodynamischen Gleichgewicht (TG) kann die Energieverteilung der Elektronen durch die Fermiverteilung $f(E) = 1/(1+\exp\{(E-E_F)/(kT)\})$ dargestellt werden, die Energieverteilung der Löcher als das *Fehlen* von Elektronen $1-f(E)$. Im TG wirken beide Verteilungen $f(E)$ und $1-f(E)$ *gleichzeitig* auf Valenzband und Leitungsband, dh. es gibt nur ein einziges Energieniveau E_F das das System beschreibt, das Ferminiveau E_F. Die resultierenden Elektronen- und Löcherdichten n bzw p sind im TG dabei durch das Massenwirkungsgesetz (MWG) $n_i^2=n\cdot p$ verbunden (n_i ... Eigenleitungsdichte). Bei Störung des TG (Beleuchtung mit $\hbar\omega > E_{gap}$ oder Ladungsträgerinjektion) gilt das MWG *nicht* mehr ($n_i^2 \neq n\cdot p$). Es gibt nun unabhängig voneinander eine Energieverteilung der Elektronen im Valenzband $f_v(E)= 1/(1+\exp\{(E-E_{Fv})/(kT)\})$ und eine im Leitungsband $f_c(E)= 1/(1+\exp\{(E-E_{Fc})/(kT)\})$. Für die Löcherverteilung gilt äquivalent im Valenzband $1-f_v(E)$ und im Leitungsband $1-f_c(E)$. Die Energieniveaus der beiden Verteilungen, die sich bei **Störung des TG** einstellen nennt man **Quasiferminiveaus** E_{Fv} und E_{Fc} und es gilt $E_{Fv} \neq E_{Fc}$.

a) Berechnen Sie für n-typ GaAs mit einer Dotierung von $n=10^{16}$ cm^{-3} die Lage des Ferminiveaus E_F relativ zur Valenzbandkante bei T=300K. (Hinweis: Benutzen Sie die Boltzmann-Näherung)
b) Der Halbleiter in Bsp. a) wird beleuchtet. Dies führt zur Erzeugung von konstant 10^{16} cm^{-3} Elektron-Loch Paaren im Halbleiter. Errechnen sie die Lage der Quasiferminiveaus (relativ zur Valenzbandkante) für diesen Fall (Hinweis: Benutzen Sie die Boltzmann-Näherung).
c) Zeichnen Sie schematisch die Verteilungen $f_v(E)$, $f_c(E)$, $1-f_v(E)$ und $1-f_c(E)$ für die in Bsp. b) berechneten Quasiferminiveaus in Relation zur Lage der Bandkanten.
d) Zeigen Sie dass die Quasiferminiveaus für einen **Halbleiter *im* TG** ident sind.

Beispiel 28 (Fermi's Goldene Regel):

Gegeben sei ein eindimensionaler, unendlich tiefer Potentialtopf der Breite L. Wird der Quantentopf mit Laserlicht der Energie $\hbar\omega = E_2-E_1$ bestrahlt, so werden Elektronen aus dem Grundzustand φ_1 in den angeregten Zustand φ_2 promoviert. Die Übergangswahrscheinlichkeit kann mittels Fermi's goldener Regel (siehe Skriptum) berechnet werden. Sie ist proportional zum Quadrat des sog. Dipol -Matrixelements

$$\mu_{1\to 2} = e\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1^*(x)\cdot x\cdot \varphi_2(x)dx$$

Ist das Matrixelement Null, so bezeichnet man den Übergang als verboten.

a) Berechnen sie $\mu_{1->2}$ für einen unendlich tiefen Potentialtopf in 1D (Hinweis: siehe Skriptum für Wellenfunktionen und Energien)
b) Zeigen Sie dass der Übergang von φ_1 zu φ_3 verboten ist.