Übungen zur Festkörperphysik I

Serie 10: Halbleiter (II)

Verteilung: 3.1.2007 Abgabe: 10.1.2007 Rückgabe: 17.1.2007

1 Schottky-Kontakt zwischen einem Metall und einem Halbleiter

Ein Schottkykontakt zwischen einem Metall und einem n-dotierten Halbleiter mit Donatorkonzentration N_D kann durch ein einfaches Modell beschrieben werden (Schottky-Modell). Die Austrittsarbeit des Metalls sei Φ_M und die Elektronenaffinität des Halbleiters sei χ_S, wobei $\chi_S < \Phi_M$. Hat man eine Vakuumbarriere zwischen den beiden Materialien, so dass kein Ladungsaustausch möglich ist, dann befinden sich die Donatorelektronen energetisch auf einem höheren Niveau als die Fermienergie des Metalls. Erlaubt man nun den Ladungsaustausch zwischen den beiden Materialien durch Eliminieren der Vakuumbarriere, so werden Elektronen aus den Donatorzuständen des Halbleiters in energetisch günstigere Zustände an der Fermikante des Metalls abwandern. Dadurch bildet sich ein elektrostatischer Dipol an der Grenzfläche zwischen den beiden Materialien, in Analogie zum pn Übergang in einer Diode.

a) Skizzieren Sie den Bandverlauf, der diesem Sachverhalt entspricht, schematisch.

b) Modellieren Sie diese Situation, indem sie die verarmten Donatoren in der Nähe der Oberfläche als konstante positive Ladungsdichte mit Schichtdicke d auffassen. Die zusätzlichen Elektronen im Metall können aufgrund der geringen Abschirmlänge in Metallen von wenigen Å als unendlich dünne negative Ladungsschicht idealisiert werden. Skizzieren Sie die entsprechenden Ladungsverteilungen als Funktion der z-Richtung senkrecht zur Grenzfläche.

c) Berechnen Sie den Verlauf der Leitungsbandkante im Halbleiter als Funktion von z. Berücksichtigen Sie dabei, dass direkt an der Grenzfläche der Abstand von der Fermikante des Metalls zur Leitungsbandkante des Halbleiters gerade $\Phi_b = \Phi_M - \chi_S$ ist. Wie dick ist die Verarmungsschicht als Funktion von Φ_b?

d) Berechnen Sie d für einen Schottkykontakt zwischen GaAs ($\chi_S = 4.5$ eV) und Platin ($\Phi_M = 5.3$ eV). Die relative dielektrische Konstante von GaAs ist $\varepsilon = 12$, die Donatorkonzentration sei $N_D = 3 \cdot 10^{17}$ cm^3.

e) Wie verändert sich die Dicke der Verarmungszone im Halbleiter, wenn man zusätzlich eine Spannung V zwischen Metall und Halbleiter anlegt? Die Spannung V sei klein gegenüber Φ_b und der Bandlücke des Halbleiters, so dass Stromfluss zwischen Metall und Halbleiter vernachlässigt werden kann.

f) Welche Kapazität pro Fläche hat der Schottkykontakt um $V = 0$ herum, wenn man die oben angegebenen Materialparameter zugrundelegt? Welche Fläche muss der Schottkykontakt haben, damit man eine Kapazität von 1 pF realisieren kann?

2 Theoretischer Wirkungsgrad einer Solarzelle

Eine Solarzelle ist im Grunde genommen ein pn-Kontakt, welcher Sonnenstrahlung direkt in elektrische Energie umwandelt. Wenn in einem idealen Halbleiter durch Licht (oder andere Strahlung) Elektronen aus dem Valenzbahn ins Leitungsband angeregt werden (Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren), nehmen die Ladungsträgerkonzentrationen im Valenz- und Leitungsband zu. Damit steigt auch die Leitfähigkeit des Halbleiters (Photoleitung). Die Rekombination der Paare wirkt der ständigen Konzentrationssteigerung entgegen.
Werden im Gebiet eines pn-Kontaktes Elektron-Loch-Paare (Δn, resp. Δp) erzeugt, so werden sie aufgrund ihrer unterschiedlichen Ladungen durch das Elektrische Feld im Raumladungsgebiet getrennt. Dadurch entsteht ein Ladungstransport und somit ein elektrischer Strom, welcher in Sperr-Richtung des pn-Kontaktes fliesst (pn-Kontakt in einem geschlossenen Stromkreis bei $U = 0$, d.h. Kurzschluss-Strom).
Die Konzentration der Majoritätsträger wird durch die Einstrahlung von Licht praktisch nicht beeinflusst, wohl aber die Minoritätsträgerkonzentration:
Majoritätsträger: $\Delta n \ll n_c^n \qquad \Delta p \ll p_v^p$
Minoritätsträger: $n_c^{p'} = n_c^p + \Delta n \qquad p_v^{n'} = p_v^n + \Delta p$
Daraus kann man sofort den resultierenden Gesamtstrom hinschreiben:

$$j_{\text{tot}} = j(n_c^n) - j(n_c^p) + j(n_v^p) - j(n_v^n) - j_{h\nu}$$

wobei $j_{h\nu} = j(\Delta n) + j(\Delta p)$ den Photostrom darstellt.
Die Strom-Spannungscharakteristik ist für eine Solarzelle:

$$j_{\text{solar}} = j_s[\exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1] - j_{h\nu}$$

wobei j_s der Sättungungsstrom in Sperr-Richtung ist.

a) Schätzen Sie den maximalen Wirkungsgrad $\eta = \frac{P}{S_0}$ einer Si-Solarzelle ab, indem Sie aus dem Kurzschluss-Strom $j_{h\nu}$ sowie aus der maximalen Spannung U_{OC} im offenen Stromkreis die maximale Leistungsabgabe $P_{\max}$ berechnen. Für Silizium ist die Flussdichte der verwendbaren Photonen aus dem Sonnenspektrum zur Bildung von Elektron-Loch-Paaren ca. $n_{\text{ph}} = 4 \cdot 10^{17}$ cm^{-2} s^{-1}. Die Quanten-Effizienz der Sonnenzelle ist definiert als Verhältnis zwischen Kurzschluss-Strom und absorbiertem Photonenfluss: $j_{h\nu}/(n_{\text{ph}} e) = 0.9$ für gut ausgelegte Solarzellen. Die Solarkonstante S_0 beträgt über der Erdatmosphäre $S_0 = 135$ mW/cm^2.

b) Bestimmen Sie den maximalen Wirkungsgrad η genauer mit Hilfe der Strom-Spannungscharakteristik. Verwenden Sie für die Sättigungsstromdichte $j_s \approx 10^{-13}$ A cm^{-2}. Vernachlässigen Sie die Verluste durch Reflexion oder durch die Effekte von Seriewiderständen, usw.