Musterlösung zu Übungsblatt 8

Aufgabe 1) **Diffusionskapazität**

Betrachten Sie eine p⁺n-Diode (Fläche $A = 10^4\ \mu\text{m}^2$) aus Silizium, bei der die Dotierung im *n*-Gebiet $n_\text{D} = 2{,}5 \cdot 10^{16}\,\text{cm}^{-3}$ beträgt. Die Länge des n-Gebiets ist deutlich größer als die Diffusionslänge $L_\text{p} \approx 100\ \mu\text{m}$ für Löcher in diesem Gebiet, so dass der Einfluss des Kontakts auf den für eine Flussspannung $U > 0$ injizierten Löcherstrom vernachlässigt werden kann.

a) Berechnen Sie die Diffusionskapazität C_D.

Lsg:

1) Nach Gl. (5.108) ist die Diffusionskapazität im n-Gebiet gegeben als

$$C_\text{Diff} = \frac{1}{2} g_0 \tau_p$$

mit dem Kleinsignal-Leitwert g_0 und der Lebensdauer τ_p.

2) Nach (5.106) und (5.99) ist

$$g_0 = \frac{Ae}{U_T L_p} D_p\, p_n \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)$$

(im Skript wird p_n anstatt p_{n0} verwendet)

3) Einsetzen in 1) und Benutzung von $D_p \tau_p = L_p^2$ ergibt

$$C_\text{Diff} = \frac{e A L_p\, p_{n0}}{2U_T} \exp\left(\frac{U}{U_T}\right).$$

b) Welche Überschusslöcherladung Q wird bei $U = 700\text{mV}$ und $T = 300\text{K}$ in der Diffusionszone des n-Gebietes gespeichert? Wie hängt diese von der Diffusionslänge L_p ab?

Lsg.:

1) Die Diffusionszone des n-Gebiet sei durch $x > l_\text{n}$ gegeben.

2) Die Darstellung der Überschusslöcherdichte wurde im letzten Übungsblatt bestimmt. Diese fällt exponentiell mit dem Abstand $x - l_\text{n}$ vom Sperrschichtrand ab und ist gegeben durch:

$$\Delta p_\text{n}(x) = p_\text{n}(x) - p_\text{n0} = p_\text{n0}\left[\exp\left(\frac{U}{U_\text{T}}\right) - 1\right]\exp\left(-\frac{x - l_\text{n}}{L_\text{p}}\right)$$

3) Die Löcherladung im *n*-Gebiet folgt durch Integration über das Volumen des Bahngebiets

$$\Delta Q_\text{n} = eA\int_{l_\text{n}}^{\infty}\left[p_\text{n}(x) - p_\text{n0}\right]dx$$

wobei die obere Integrationsgrenze wegen der großen Weite des Bahngebietes und des exponentiellen Abfalls der Löcherdichte mit dem Abstand vom Sperrschichtrand durch ∞ ersetzt wurde.

4) Mit dem Ausdruck für $p_\text{n}(x) - p_\text{n0}$ folgt so

$$\Delta Q_\text{n} = eL_\text{p}\, p_\text{n0} A\left[\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1\right].$$

Mit $U = 700\,\mathrm{mV}$, $U_T = 25.85\,\mathrm{mV}$ (bei $T = 300\,\mathrm{K}$) und $p_{n0} \approx \frac{n_i^2}{n_D} \approx 9000\,\mathrm{cm}^{-3}$ ergibt dies

$$\Delta Q_n \approx 8.3 \cdot 10^{-10}\ \mathrm{As}.$$

5) Die injizierte Löcherladung steigt proportional mit der Diff.-Länge an: $\Delta Q_n \propto L_p$

c) Berechnen Sie die Änderung ΔQ der in der Diffusionszone gespeicherten Ladung Q, wenn die angelegte statische Spannung um einen Betrag ΔU geändert wird.

Lsg: ΔQ_n nach U ableiten ergibt

$$\frac{d(\Delta Q_n)}{dU} = \frac{eL_p p_{n0} A}{U_T} \exp\left(\frac{U}{U_T}\right).$$

d) Vergleichen Sie das Verhältnis $\Delta Q / \Delta U$ mit der in a) berechneten Diffusionskapazität. Für eine gegebene Spannungsänderung ΔU ist die Änderung ΔQ der in der Diffusionszone gespeicherten Minoritätsträgerladungen offensichtlich doppelt so groß wie der im äußeren Stromkreis messbare Ladungstransport, der durch die Diffusionskapazität C_D beschrieben wird. Auf welchem Weg verschwindet die andere Hälfte der Löcher aus der Diffusionszone?

Lsg: Vergleich der Ergebnisse von a) und c) ergibt:

$$\frac{d(\Delta Q_n)}{dU} = 2 \cdot C_{\mathrm{Diff}}$$

Nur die Ladungsänderung, die durch die Diffusionskapazität beschrieben wird, ist von außen abrufbar. Die andere Hälfte der Ladungsänderung verschwindet durch Rekombination.

Aufgabe 2) **Ersatzschaltbild**

Eine pn-Diode wird wie abgebildet betrieben. Die Spannung an der Diode im Arbeitspunkt beträgt $U = 0{,}7\,\mathrm{V}$.

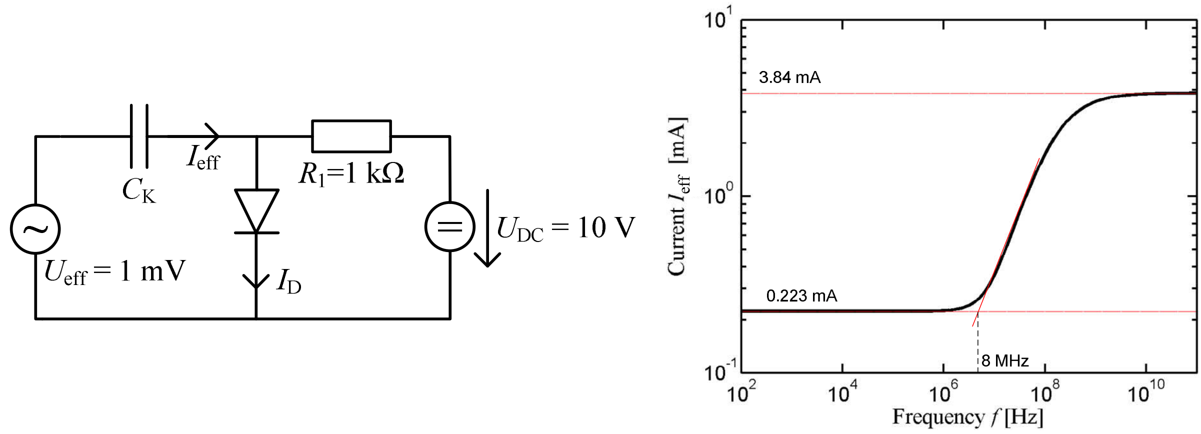
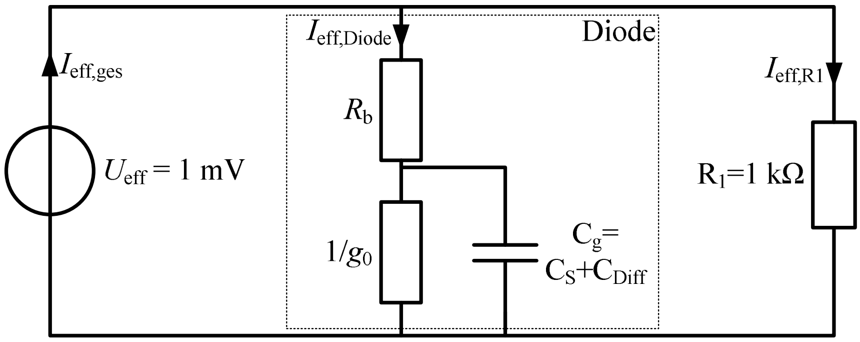


Fig. 1: Diode mit äußerer Beschaltung (links), Frequenzgang des Gesamtstroms (rechts). Die Frequenz, bei welcher der Strom um einen Faktor $\sqrt{2}$ angestiegen ist, liegt bei 8 MHz.

a) Zeichnen Sie die zugehörige Kleinsignal-Ersatzschaltung. Behandeln Sie die Kapazität C_K für alle betrachteten Frequenzen als Kurzschluss. Berücksichtigen Sie dabei den Bahnwiderstand R_b der Diode und fassen Sie die Sperrschichtkapazität und die Diffusionskapazität zu einer Gesamtkapazität C_g zusammen.

Lsg: Wird C_K durch einen Kurzschluss ersetzt und der Serien-Bahnwiderstand berücksichtigt, so resultiert die Kleinsignalersatzschaltung:



b) Bestimmen Sie die Elemente der Kleinsignal-Ersatzschaltung der Diode (Bahnwiderstand, Kleinsignal-Leitwert, Gesamtkapazität) mit Hilfe des rechts skizzierten Frequenzganges des Gesamtstroms aus der Wechselspannungsquelle I_{eff}. Nutzen Sie dabei die Tatsache, dass der Bahnwiderstand sehr klein ist im Vergleich zu den anderen Widerständen ist.

Lsg: Der Effektivwert des Stroms durch den 1 kΩ-Widerstand ist $I_{eff,R1} = 1\,\mu A$.
Bei geringen Frequenzen fließt demzufolge der Strom $I_{eff,Diode} = I_{eff,ges} - I_{eff,R1} = 222\,\mu A$ durch die Reihenschaltung von R_b und $R_{diff} = 1/g_0$ (es fließt näherungsweise kein Strom durch die Kapazität).

Dies führt zu:

$$R_b + R_{diff} = \frac{U_{eff}}{I_{eff,ges(1)} - U_{eff}/R_1} = \frac{1\,mV}{222\,\mu A} = 4{,}5\,\Omega\,.$$

Bei hohen Frequenzen wird R_{diff} durch C_{ges} kurzgeschlossen. Durch R_b fließt nun der Strom $I_{eff,Diode} = 3{,}84$ mA, so dass

$$R_b = \frac{U_{eff}}{I_{eff,ges(2)} - U_{eff}/R_1} = \frac{1\,mV}{3{,}84\text{ mA}} = 0.26\,\Omega\,.$$

Dies führt zu $R_{diff} = 4{,}24\,\Omega$.

Bei der Grenzfrequenz 8 MHz ist $\omega C_g = g_0$ (Stromanstieg um $\sqrt{2}$), bzw.

$$C_{ges} = \frac{1}{2\pi \cdot 4{,}24\,\Omega \cdot 8 \cdot 10^6\text{ Hz}} = 4{,}69\text{ nF}$$

Aufgabe 3) **Zenerdiode**

Bei einseitig abrupt dotierten pn-Übergängen in Silizium ($n_i = 1{,}5 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-3}$, $\varepsilon_r = 12$) kommt es typischerweise bei Feldstärken von ca. $5{\cdot}10^5$ V/cm zu einem Zenerdurchbruch. Im Folgenden soll ein p-n-Übergang in Silizium betrachtet werden mit den Dotierungsdichten $n_A = 10^{18}\,\mathrm{cm}^{-3}$, $n_D = 2{\cdot}10^{17}\,\mathrm{cm}^{-3}$.

a) Berechnen Sie die Durchbruchspannung des Bauteils.

Lösung:

1) Bei einer angelegten Spannung ist an der Diode (Gl. 6.41): $|E_m| = \sqrt{\dfrac{2e}{\varepsilon_0\varepsilon_r}\dfrac{U_D - U}{(1/n_A + 1/n_D)}}$

Die Diffusionsspannung ist: $U_D = U_T \ln\left(\dfrac{n_A n_D}{n_i^2}\right) = 0.89\mathrm{V}$

2) Der Durchbruch erfolgt, wenn die Feldstärke an der Grenzfläche $|E_m|$ den Schwellwert erreicht. Dies geschieht bei einer angelegten Spannung von:

$$U = U_D - \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r}{2e}|E_m|^2 (1/n_A + 1/n_D) = -4.08$$

b) Kommt es bei dieser Spannung tatsächlich zu einem Zenerdurchbruch und nicht zu einem Lawinendurchbruch? Begründen Sie Ihre Antwort mit Fig. 2.

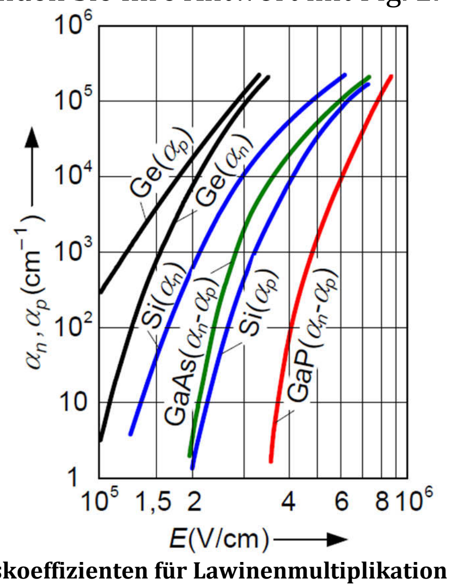


Fig. 2: Gemessene Ionisationskoeffizienten für Lawinenmultiplikation als Funktion der Feldstärke.
(aus Müller, R.: Grundlagen der Halbleiter-Elektronik, Springer, 1984)

Lösung:

1) Ein primäres Loch bzw. primäres Elektron erzeugt innerhalb der Laufstrecke dx im Mittel $\alpha_n dx$ bzw. $\alpha_p dx$ Trägerpaare, wobei die Ionisierungskoeffizienten von der Feldstärke abhängig sind. Eine große Feldstärke E tritt dabei nur in der Raumladungszone der Diode auf, wobei die Feldstärke dreieckförmig von 0 auf E_m ansteigt, siehe Abb. 6.2 im Skript.

2) Der numerische Wert der Ionisierungskoeffizienten nimmt von E_{max} bis $E_{\mathrm{max}}/2$ um eine Größenordnung ab. Wegen dem linearen Anstieg des E-Feldes betrachten wir entsprechend nur Ionisierung innerhalb der mittleren Hälfte der RLZ. Die Ionisierung in dieser Zone schätzen wir nach oben durch Annahme des maximalen Feldes und des maximalen Ionisierungskoeffizienten ab.

$$\alpha_{\mathrm{n}}\left(E_{\mathrm{max}}\right)\cdot l_{\mathrm{n}}/2 = 1\cdot 10^{5}\,\mathrm{cm}^{-1}\cdot 100\mathrm{nm} = 1$$

Dies war das Ergebnis einer Abschätzung nach oben und für die stärker ionisierende Trägerart. Um einen Lawinendurchbruch zu erzeugen, muss $\alpha l > 1$ gelten. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass der Zener-Durchbruch dominiert.