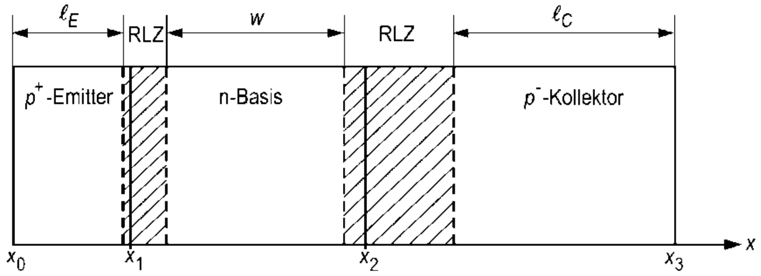
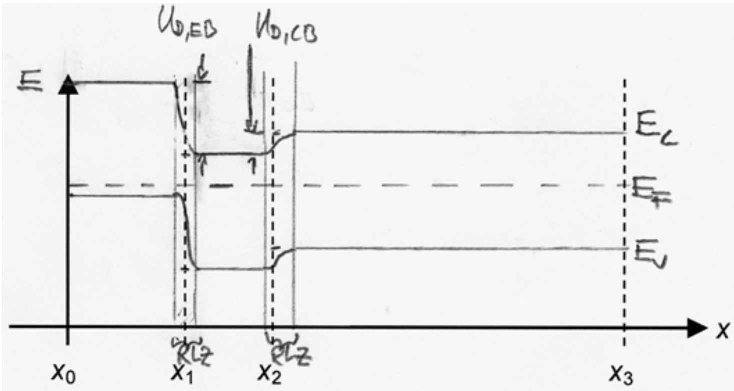
Musterlösung zu Übungsblatt 14

Aufgabe 1: Bipolartransistor



Betrachtet wird ein *pnp*-Transistor aus Silizium. Die Dotierungen von Emitter, Basis und Kollektor betragen $n_{AE} = 1 \cdot 10^{19}$ cm^{-3}, $n_{DB} = 2 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}, $n_{AC} = 5 \cdot 10^{15}$ cm^{-3}. Die zugehörigen physikalischen Längen betragen $(x_1 - x_0) = 1$ µm, $(x_2 - x_1) = 0{,}2$ µm, $(x_3 - x_2) = 3$ µm. Gehen Sie im Folgenden davon aus, dass die Schottky-Näherung gilt, Störstellenerschöpfung vorliegt und die Temperatur $T = 300$ K beträgt. Die intrinsische Ladungsträgerdichte beträgt $n_i = 1{,}5 \cdot 10^{10}$ cm^{-3}.

1.1 Skizzieren Sie den Verlauf von Valenzband, Leitungsband und Fermi-Niveau für eine Basis-Emitter-Spannung $U_{BE} = 0$ V und eine Basis-Kollektor-Spannung $U_{BC} = 0$ V. Markieren Sie die Raumladungszonen.



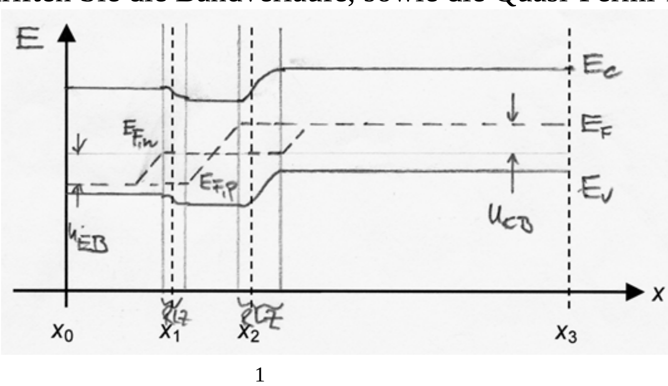
1.2 Nun wird eine Basis-Emitter-Spannung $U_{BE} = -0{,}7$ V und eine Basis-Kollektor Spannung $U_{BC} = 0{,}8$ V angelegt.

(a) Werden die Übergänge dabei jeweils in Sperr- oder Durchlassrichtung gepolt? Welcher Betriebszustand des Transistors ergibt sich?

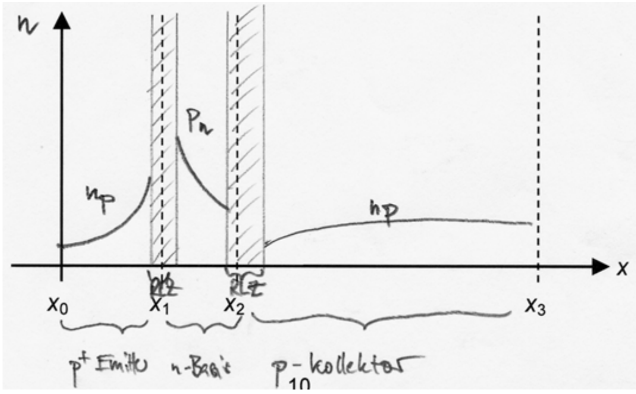
Lösung: Basis-Emitter Durchlassrichtung / Basis-Kollektor Sperrrichtung, aktiver/normaler Betrieb

(b) Werden die Raumladungszonen kleiner oder größer im Vergleich zu $U_{BE} = U_{BC} = 0$?
Lösung: Emitter-Basis RLZ wird kleiner, Basis-Kollektor RLZ wird größer

(c) Skizzieren und beschriften Sie die Bandverläufe, sowie die Quasi-Fermi-Niveaus.

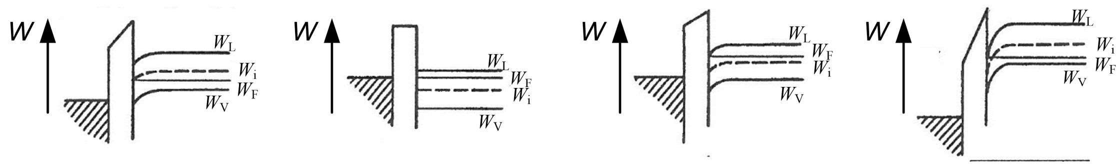


(d) Skizzieren und beschriften Sie den Verlauf der Trägerdichten außerhalb der Raumladungszonen.

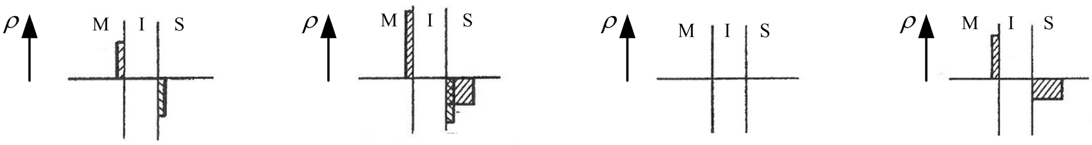


Aufgabe 2: MOSFET und MIS-Struktur

2.1 Im Folgenden sind vier verschiedene Metall-Isolator-Halbleiter-(MIS-)Strukturen skizziert. Ordnen Sie den Bandverläufen (I) bis (IV) die Ladungsträgerverteilungen (a) bis (d) zu. Bestimmen Sie dabei, welche Dotierung (*n* oder *p*) im Halbleiter vorliegt. W_F bezeichnet die Fermi-Energie, W_i die Mitte der Bandlücke.



(I) (II) (III) (IV)

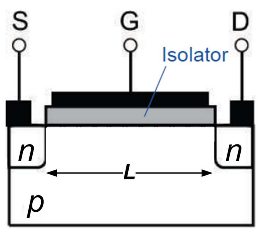


(a) (b) (c) (d)

2.2 Ordnen Sie die gezeigten Bandverläufe den folgenden Betriebszuständen der MIS-Struktur zu: Verarmung, Anreicherung, starke Inversion, Flachbandfall.

Bandverlauf	**Ladungsträgerverteilung (a) - (d)**	**Dotierung *p* oder *n***
(I)	(d)	p
(II)	(c)	n
(III)	(a)	n
(IV)	(b)	p

Bei einem *n*-Kanal MOSFET beträgt die Kanallänge L = 2 µm, die Kanalbreite b = 15 µm (senkrecht zur Zeichenebene), und der Kapazitätsbelag des Gates wird mit $C' = 6{,}9 \cdot 10^{-8}$ F/cm^2 angegeben.



Für eine Drain-Source-Spannung von U_{DS} = 0,1 V werden im ohmschen Bereich die folgenden Drainströme I_D gemessen:
Arbeitspunkt 1: U_{GS} = 1.5 V, I_D = 35 µA;
Arbeitspunkt 2: U_{GS} = 2.5 V, I_D = 75 µA.

2.3 Berechnen Sie für den oben beschriebenen MOSFET die Schwellenspannung U_{th} und die Elektronenbeweglichkeit μ_n im Kanal.

$$I_D = \frac{\mu_n bC'}{2L}\left[U_{DS,sat}^2 - \left(U_{DS} - U_{DS,sat}\right)^2\right],\ U_{DS,sat} = U_{GS} - U_{th}$$

$$I_D = -\frac{\mu_n bC'}{2L}\left[U_{DS}^2 - 2U_{DS}\left(U_{GS} - U_{th}\right)\right]$$

$$I_{D1} - I_{D2} = \frac{\mu_n bC'}{L} U_{DS}\left(U_{GS1} - U_{GS2}\right)$$

$$\mu_n = -\frac{\left(I_{D1} - I_{D2}\right)L}{bC'U_{DS}\left(U_{GS1} - U_{GS2}\right)}$$

$$\mu_n = 773\ \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

$$U_{th} = -\frac{\dfrac{2I_D L}{\mu_n bC'} + U_{DS}^2}{2U_{DS}} + U_{GS}$$

$$U_{th} = 0{,}575\ \text{V}$$

2.4 An das oben beschriebene Bauteil wird eine Gate-Source-Spannung von U_{GS} = 2,5 V angelegt. Berechnen Sie die Drain-Source-Spannung, bei welcher der Sättigungsbereich beginnt, sowie den Sättigungsstrom.

$$U_{\text{DS,sat}} = U_{\text{GS}} - U_{\text{th}} = 1{,}925\text{V}$$

$$\text{I}_{\text{D,Ohm'sch}} = \frac{\mu_n bC'}{2L}\left[U_{\text{DS,sat}}^2 - \left(U_{\text{DS}} - U_{\text{DS,sat}}\right)^2\right]$$

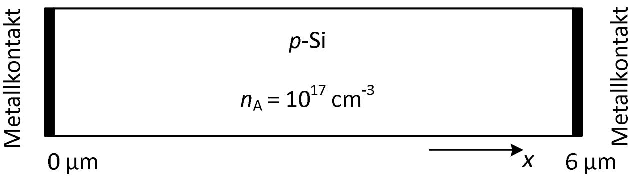
$$I_{\text{D,sat}} = \frac{\mu_n bC'}{2L} U_{\text{DS,sat}}^2 = 741\ \mu\text{A}$$

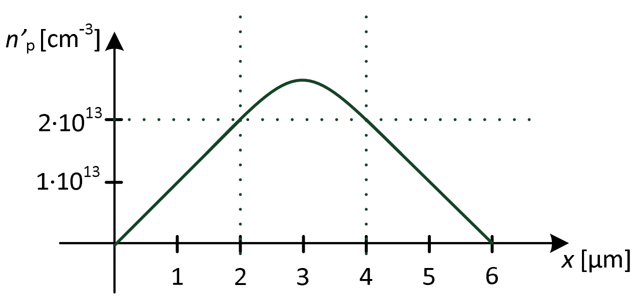
Aufgabe 3: Beleuchtete Halbleiterprobe

Eine 6 µm lange Siliziumprobe ist an beiden Enden metallisiert. Eine externe Spannung ist nicht angelegt. Die Probe wird räumlich inhomogen in einer Weise beleuchtet, dass die stationäre Überschussminoritätsträgerdichte $n'_\text{p}(x)$ den folgenden Verlauf zeigt:

$$n'_\text{p}(x) = \begin{cases} 10^{25}\ \text{m}^{-4} x & \text{für } 0\ \mu\text{m} \le x \le 2\ \mu\text{m} \\ 2{,}5\cdot 10^{19}\ \text{m}^{-3} - 0{,}5\cdot 10^{31}\ \text{m}^{-5}\left(x - 3\ \mu\text{m}\right)^2 & \text{für } 2\ \mu\text{m} < x \le 4\ \mu\text{m} \\ 10^{25}\ \text{m}^{-4}\left(6\ \mu\text{m} - x\right) & \text{für } 4\ \mu\text{m} < x \le 6\ \mu\text{m} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Probe ist p-dotiert mit einer Dichte von $n_\text{A} = 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$. Die Beweglichkeit der Elektronen ist $\mu_\text{n} = 1600\ \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$, die der Löcher $\mu_\text{p} = 800\ \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$. Die Eigenleitungsträgerdichte ist $n_\text{i} = 10^{10}\ \text{cm}^{-3}$ und die Diffusionslänge der Minoritätsträger beträgt $L_\text{n} = 60\ \mu\text{m}$. Nehmen Sie für alle Berechnungen schwache Injektion an und gehen Sie davon aus, dass sich die Probe im stationären Zustand befindet. Die Temperatur beträgt T = 300 K und es liegt Störstellenerschöpfung vor.





3.1 Berechnen Sie die Diffusionskonstanten D_n und D_p sowie die Minoritätsträgerlebensdauer τ_n des Halbleiters.

$$D_\mathrm{n} = \frac{kT}{e}\mu_\mathrm{n} = 0.0259\ \mathrm{eV}\cdot 1600\frac{\mathrm{cm}^2}{\mathrm{Vs}} = 4{,}1\cdot 10^{-3}\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$$

$$D_\mathrm{p} = \frac{kT}{e}\mu_\mathrm{p} = 0.0259\ \mathrm{eV}\cdot 800\frac{\mathrm{cm}^2}{\mathrm{Vs}} = 2{,}05\cdot 10^{-3}\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}$$

$$L_\mathrm{n} = \sqrt{D_\mathrm{n}\tau} \rightarrow \tau = \frac{L_\mathrm{n}^{\ 2}}{D_\mathrm{n}} = 870\mathrm{ns}$$

3.2 Berechnen Sie den Verlauf der Minoritätsträgerstromdichte $J_\mathrm{n}(x)$ im Intervall $0 < x < 6\ \mu\mathrm{m}$ und skizzieren Sie den Verlauf. Verwenden Sie dabei sinnvolle Näherungen und begründen Sie Ihr Vorgehen.

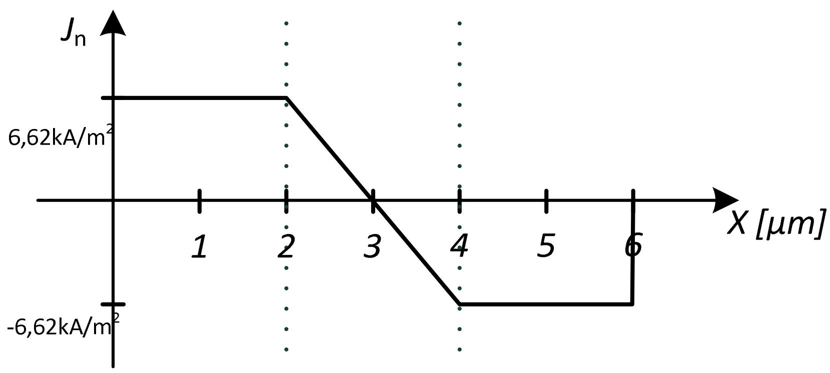
Lösung: Die Minoritätsträgerstromdichte ergibt sich allein aus dem Diffusionsstrom der Minoritäten $J_\mathrm{n} = J_\mathrm{n,D} = eD_\mathrm{n}\frac{\partial n'_\mathrm{p}}{\partial x}$, da schwache Injektion vorliegt und $n'_\mathrm{p}(x) << p_\mathrm{p,0}$. Der Driftanteil kann vernachlässigt werden.

Der Gradient der Überschussminoritätsträgerdichte ergibt sich zu:

$$\frac{\partial n'_\mathrm{p}}{\partial x} = \begin{cases} 10^{25}\ \mathrm{m}^{-4} & \text{, für } 0\ \mu\mathrm{m} \le x \le 2\ \mu\mathrm{m} \\ -1\cdot 10^{31}\mathrm{m}^{-5}(x - 3\ \mu\mathrm{m}) & \text{, für } 2\ \mu\mathrm{m} < x \le 4\ \mu\mathrm{m} \\ -10^{25}\ \mathrm{m}^{-4} & \text{, für } 4\ \mu\mathrm{m} < x \le 6\ \mu\mathrm{m} \\ 0 & \text{, sonst} \end{cases}$$

Daraus folgt für die Stromdichte mit $eD_\mathrm{n} = 6{,}62\cdot 10^{-22}\ \mathrm{Am}^2$

$$J_\mathrm{n,D} = \begin{cases} 6{,}62\frac{\mathrm{kA}}{\mathrm{m}^2} & \text{, für } 0\ \mu\mathrm{m} \le x \le 2\ \mu\mathrm{m} \\ -6{,}62\frac{\mathrm{kA}}{\mathrm{m}^3}\cdot 10^6(x - 3\ \mu\mathrm{m}) & \text{, für } 2\ \mu\mathrm{m} < x \le 4\ \mu\mathrm{m} \\ -6{,}62\frac{\mathrm{kA}}{\mathrm{m}^2} & \text{, für } 4\ \mu\mathrm{m} < x \le 6\ \mu\mathrm{m} \\ 0 & \text{, sonst} \end{cases}$$



3.3 Welche Überschussmajoritätsträgerdichte $p'_\mathrm{p}(x)$ und Majoritätsträgerstromdichte $J_\mathrm{p}(x)$ stellen sich im stationären Zustand ein? Verwenden Sie sinnvolle Näherungen und begründen Sie Ihr Vorgehen.

Lösung: Im stationären Zustand erzeugt der höhere Diffusionsdruck der Minoritäten eine geladene Trägerdichtestörung und damit ein elektrisches Feld. Diese Dichtestörung wird aufgrund der hohen thermisch generierten Löcherdichte quasi-instantan (innerhalb der dielektrischen Relaxationszeit) ausgeglichen, so dass Quasi-Neutralität herrscht und es gilt: $p'_{\mathrm{p}}(x) = n'_{\mathrm{p}}(x)$.

Da überdies im stationären Fall kein Nettostrom fließen kann, gleichten Drift- und Diffusionsstrom der Majoritäten den Minoritätenstrom genau aus: $J_{\mathrm{p}}(x) = -J_{\mathrm{n}}$.

3.4 Berechnen Sie den Verlauf der Generationsfunktion $g_{\mathrm{L}}(x)$ im Intervall $0 < x < 6\ \mu\mathrm{m}$ unter Vernachlässigung der Rekombination im Volumen des Halbleiters. Gehen Sie davon aus, dass sich die Probe nach wie vor im stationären Zustand befindet.

Lösung: Die Generationsfunktion lässt sich über die Kontinuitätsgleichung der Minoritäten bestimmen.

$$\frac{\partial n'_{\mathrm{p}}}{\partial t} - \frac{1}{e}\frac{\partial J_{\mathrm{n}}(x)}{\partial x} = g_L(x) - \frac{n'_{\mathrm{p}}}{\tau}$$

Da der stationäre Zustand betrachtet wird und die Rekombination vernachlässigt wird, vereinfacht sich dieser Ausdruck zu:

$$g_L(x) = -\frac{1}{e}\frac{\partial J_{\mathrm{n}}(x)}{\partial x} = -D_{\mathrm{n}}\frac{\partial^2 n'_{\mathrm{p}}(x)}{\partial x^2}$$

$$g_L(x) = \begin{cases} 0 & \text{, für } 0\ \mu\mathrm{m} \le x \le 2\ \mu\mathrm{m} \\ 4{,}14 \cdot 10^{16}\ \mathrm{cm^{-3}s^{-1}} & \text{, für } 2\ \mu\mathrm{m} < x \le 4\ \mu\mathrm{m} \\ 0 & \text{, für } 4\ \mu\mathrm{m} < x \le 6\ \mu\mathrm{m} \\ 0 & \text{, sonst} \end{cases}$$