

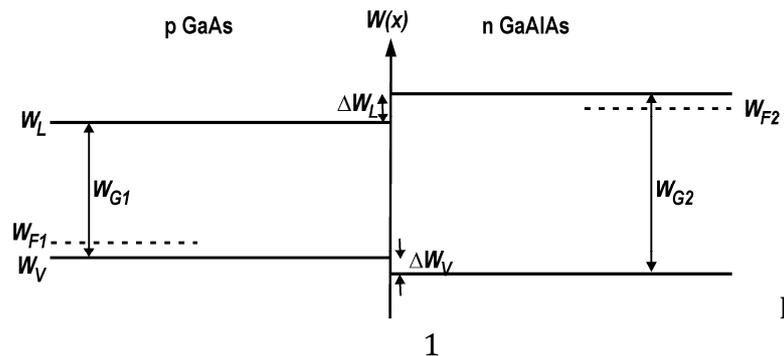
Übungsblatt 10

Aufgabe 1) pn-Laserdiode

Eine pn-Laserdiode sei als Heterostruktur aufgebaut, d.h. auf der p- und n-Seite werden unterschiedliche Materialien mit unterschiedlichen Bandabständen verwendet. Die p-Seite ist aus GaAs mit einem Bandabstand $W_{G1} = 1.4 \text{ eV}$, $\epsilon_r = 12.9$ und mit $n_A = 0.2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ dotiert.

Die n-Seite ist aus GaAlAs mit $W_{G2} = 1.8 \text{ eV}$, $\epsilon_r = 11.5$ und mit $n_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ dotiert.

Im sogenannten Flachbandfall, wird eine äußere Spannung so angelegt, dass die Bänder am Übergang nicht verbogen sind, siehe Figur 1.



Figur 1

Die Leitungsbandkante erfährt am abrupten Übergang einen Sprung $\Delta W_L = 0.26 \text{ eV}$, die Valenzbandkante einen Sprung $\Delta W_V = 0.14 \text{ eV}$. Die Temperatur beträgt $T = 300 \text{ K}$. Die p- und n-Seite haben die gleichen äquivalenten Zustandsdichten. Die Eigenleitungsträgerdichte in GaAs sei $n_i = 1.8 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$. Es gilt Störstellenerschöpfung.

- a) Skizzieren Sie unter Angabe der entsprechenden Gleichungen die Verläufe der Raumladungsdichte $\rho(x)$, des elektrischen Feldes $E(x)$, des Potentials $\phi(x)$ und das Banddiagramm $W(x)$, wenn keine äußere Spannung angelegt ist. Es gelte die Schottky-Näherung. Beachten Sie beim Skizzieren des elektrischen Feldes die Randbedingung an der Materialgrenzfläche.

<p>p: $\epsilon_r = 12.9$ $W_{G1} = 1.4 \text{ eV}$ $n_A = 0.2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$</p>	<p>n: $\epsilon_r = 11.5$ $W_{G2} = 1.8 \text{ eV}$ $n_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$</p>
---	---

Schottky-Näherung
 $\Delta W_L = 0.26 \text{ eV}$, $\Delta W_V = 0.14 \text{ eV}$,
 $T = 300 \text{ K}$, $n_i = 1.8 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$

Ges.: Skizze für $\rho(x)$, $E(x)$, $\phi(x)$ und das Banddiagramm $W(x)$

Lsg.:

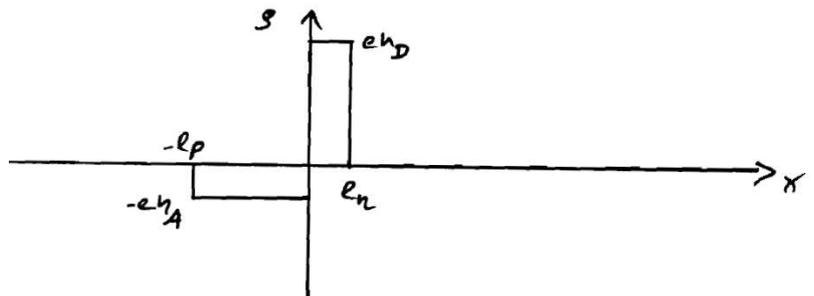
1) Raumladungsdichten $\rho(x)$:

$$\rho(x) = e[n_D - n(x) - n_A + p(x)]$$

mit der Schottky Näherung

$$n(x) = p(x) = 0 \text{ folgt}$$

$$\rho(x) = \begin{cases} -en_A & -l_p < x < 0 \\ en_D & \text{für } 0 < x < l_n \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$



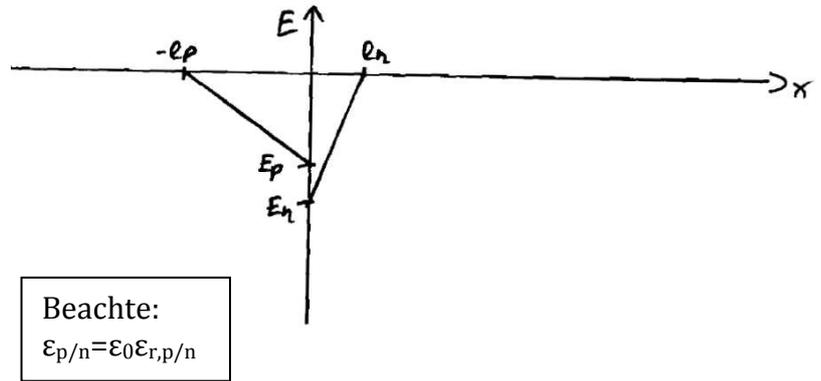
2) **Feldstärke** $E(x)$:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \rightarrow \frac{d(\epsilon E)}{dx} = \rho$$

bzw. $\epsilon E = \int \rho dx$

Die auf p- und n-Seite verschiedenen ϵ ergeben an der Stelle $x = 0$ einen Sprung im E-Feld:

$$\epsilon_p E_p = \epsilon_n E_n \rightarrow E_n = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_n} E_p$$

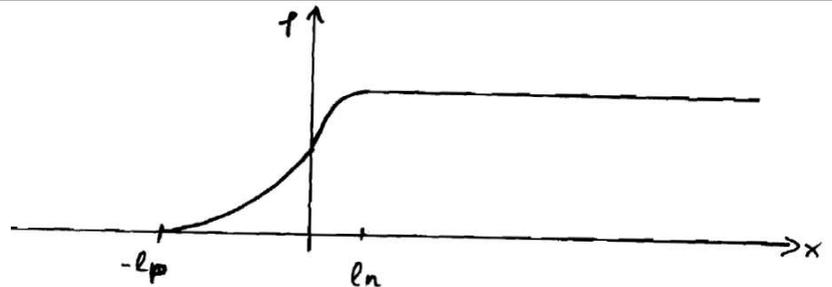


3) **Potential** $\varphi(x)$: Der Verlauf folgt

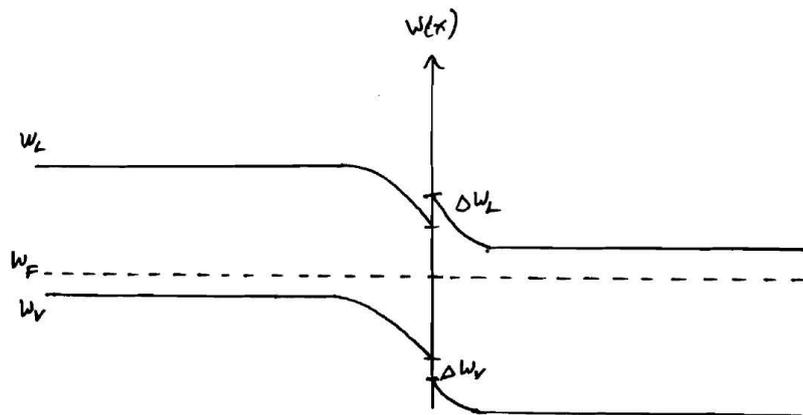
mit $\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi \Rightarrow \frac{d\varphi}{dx} = -E$

bzw. $\varphi = -\int E dx$

Achtung: Die Steigung von φ ändert sich bei $x = 0$.



4) Das **Banddiagramm** $W(x)$ sieht folgendermaßen aus: $W(x) = W - e\varphi(x)$



b) Betrachten Sie nun den Flachbandfall und skizzieren Sie den Verlauf der Quasi-Ferminiveaus im pn-Übergang. Markieren Sie die Raumladungs- und Diffusionsgebiete. Welche Spannung muss an die Diode angelegt werden, damit es zum Flachbandfall kommt? Wo muss der „+“-Pol der Spannung angelegt werden? Liegt in diesem Fall optischer Gewinn vor?

Geg.: Flachbandfall

Ges.: Skizze für Quasi-Ferminiveaus, die Raumladungs- und Diffusionsgebiete

Lsg.:

Es gibt im Flachbandfall (ideal) keine Raumladungszonen: Die in der Aufgabenstellung gegebenen Quasi-Ferminiveaus lassen sich nur auf die folgende Art miteinander verbinden (gestrichelt):

Optischer Gewinn liegt vor, wenn die Separation der Quasi-Ferminiveaus größer als der Bandabstand ist und wenn mindestens ein Quasi-Ferminiveau im Band liegt.

Für den p-Halbleiter liegt das Quasi-Ferminiveau für Elektronen am Rande des pn-Übergangs im Leitungsband. Die Separation der Quasi-Ferminiveaus ist dort allerdings kleiner als der Bandabstand $W_{GI} = 1.4eV > 1.38eV$, so dass kein optischer Gewinn vorliegt.

- c) Berechnen Sie die maximale Feldstärke E_{max} in der Diode, wenn keine äußere Spannung angelegt ist. Beachten Sie dabei, dass die in b) berechnete „Flachbandspannung“ gerade der Diffusionsspannung der Diode entspricht.

Ges.: E_{max} , für $U = 0 V$.

Lsg.:

1) Das E -Feld springt bei $x = 0$ um $\epsilon_p E_p = \epsilon_n E_n$, $E_p = \frac{\epsilon_n}{\epsilon_p} E_n$

2) Mit den Zeichnungen und Gleichungen aus a) folgt: $E_p = -e n_A l_p / \epsilon_p$ und $E_n = -e n_D l_n / \epsilon_n$

(Flächeninhalte der Rechtecke in der $\rho(x)$ -Verteilung).

3) Für das Potential gilt allgemein: $\varphi = -\int E dx$: $\varphi_{ges} = -\frac{1}{2} E_p l_p - \frac{1}{2} E_n l_n$,

(Flächeninhalte der Dreiecke in der $E(x)$ -Verteilung)

4) Wegen Ladungsneutralität gilt mit Gl. (6.28) und (6.29): $l_p = l_n n_D / n_A$

5) Einsetzen von 1) und 4) in 3) und ersetzen von l_n mittels 2):

$$\varphi_{ges} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_n}{\epsilon_p} E_n l_n \frac{n_D}{n_A} - \frac{1}{2} E_n l_n \rightarrow \varphi_{ges} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_n^2}{e} E_n^2 \left(\frac{1}{n_A \epsilon_p} + \frac{1}{n_D \epsilon_n} \right).$$

Dies entspricht der Spannung $U = 1.38V$ des Flachbandfalls (b).

Die maximale Feldstärke beträgt somit:

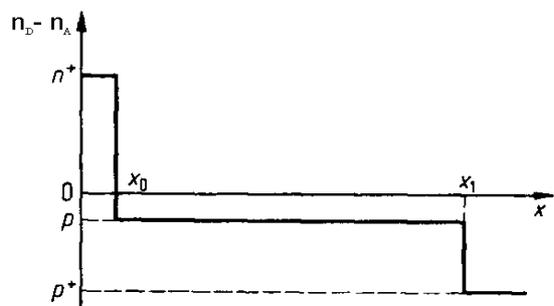
$$E_{max} = |E_n| = \sqrt{\frac{2e\varphi_{ges}}{\epsilon_n^2 \left(\frac{1}{n_A \epsilon_p} + \frac{1}{n_D \epsilon_n} \right)}} = 2.82 \cdot 10^6 \frac{V}{m}$$

Aufgabe 2) IMPATT-Diode

Eine Lawinenlaufzeitdiode aus Silizium ($\epsilon_r = 11,9$) ist n⁺pp⁺-strukturiert. Für den Oszillatorbetrieb gelten drei Anforderungen:

i) An der Stelle x_0 muss die elektrische Feldstärke den zur Lawinenmultiplikation notwendigen Wert von $E_0 = 4 \cdot 10^5 V/cm$ erreichen.

ii) In der gesamten p-Zone muss die elektrische Feldstärke mindestens den zur Aufrechterhaltung einer gesättigten Ladungsträgersgeschwindigkeit von $v_s = 10^7 cm/s$ erforderlichen Wert $E_1 = 5 \cdot 10^4 V/cm$ erreichen.



iii) Die Laufzeit τ der Ladungsträger in der p-Zone muss gleich der halben Periodendauer der Schwingungen sein, die der Oszillator erzeugen soll. Die Zone bei x_0 , in der die Multiplikation erfolgt, sei vernachlässigbar kurz gegen die Länge der p-Zone.

- a) Wie lang muss $x_p = x_1 - x_0$ (der p-Bereich) sein, damit der Oszillator bei 10 GHz arbeitet?

Lösung:

Gegeben: Mittlere Ladungsträgergeschwindigkeit von $v_s = 10^7$ cm/s in p-Zone

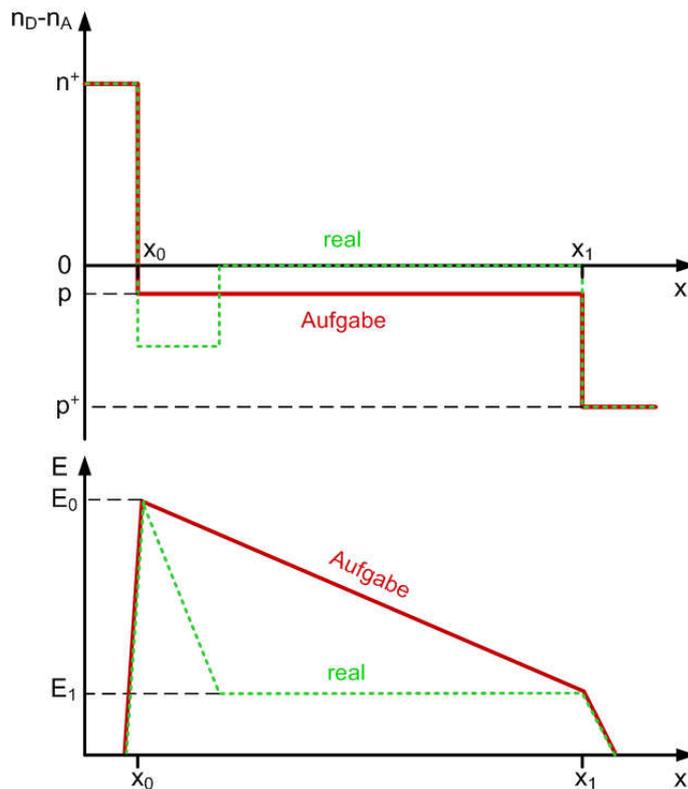
Laufzeit $\tau = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f}$ (dabei $f = 10\text{GHz}$)

Ges.: Länge $x_p = x_1 - x_0$ der p-Zone

$$x_p = x_1 - x_0 = v_s \tau = v_s / 2f \rightarrow x_p = 5 \mu\text{m}$$

- b) Wie stark muss die p-Zone dotiert sein, damit im Arbeitspunkt die Feldstärke E_0 bei x_0 und die Feldstärke E_1 bei x_1 herrscht? Nehmen Sie an, dass keine freien Ladungsträger in der p-Zone existieren und die Störstellen erschöpft sind.

Lösung:



Geg.:

$E_0 = 4 \cdot 10^5$ V/cm bei x_0 ,

$E_1 = 5 \cdot 10^4$ V/cm bei x_1 ,

SSE.

Ges.: Erforderliche Dotierung, n_A in p-Zone $[x_0, x_1]$

Die Poisson-Gleichung in 1D lässt sich unter Schottky-Näherung und SSE vereinfachen, da dann $\rho = \text{const.}$ in der gesamten RLZ gilt:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} \rightarrow \frac{E(x_1) - E(x_0)}{x_1 - x_0} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

Die Raumladung besteht aufgrund ionisierter Akzeptoren: $\rho = -en_A$. Damit ist:

$$n_A = -\frac{\epsilon}{e} \frac{E(x_1) - E(x_0)}{x_1 - x_0} \rightarrow n_A = 4.6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

- c) Wie groß ist die Spannung U_C an der RLZ bei der gerade Multiplikation bei x_0 einsetzt? Vernachlässigen Sie den Spannungsabfall in der n^+ - und p^+ -Zone sowie die Diffusionsspannung.

Lösung:

Ges.: Arbeitsspannung U_C über der p-Zone $[x_0, x_1]$

- i) U_C ist die Spannung, die zum Betrieb zwischen x_0 und x_1 anliegen muss:

$$U_C = -\int_{x_0}^{x_1} E(x) dx$$

- ii) Die Feldstärke verläuft zwischen x_0 und x_1 linear: $E(x) = E_0 + \frac{E_1 - E_0}{x_1 - x_0} (x - x_0)$

$$U_C = -\int_{x_0}^{x_1} E(x) dx = -\left[E_0 x + \frac{1}{2} \frac{E_1 - E_0}{x_1 - x_0} x^2 - \frac{E_1 - E_0}{x_1 - x_0} x x_0 \right]_{x_0}^{x_1}$$

$$U_C = -\frac{1}{2} (E_1 + E_0) (x_1 - x_0) \rightarrow U_C = -112.5 \text{ V}$$