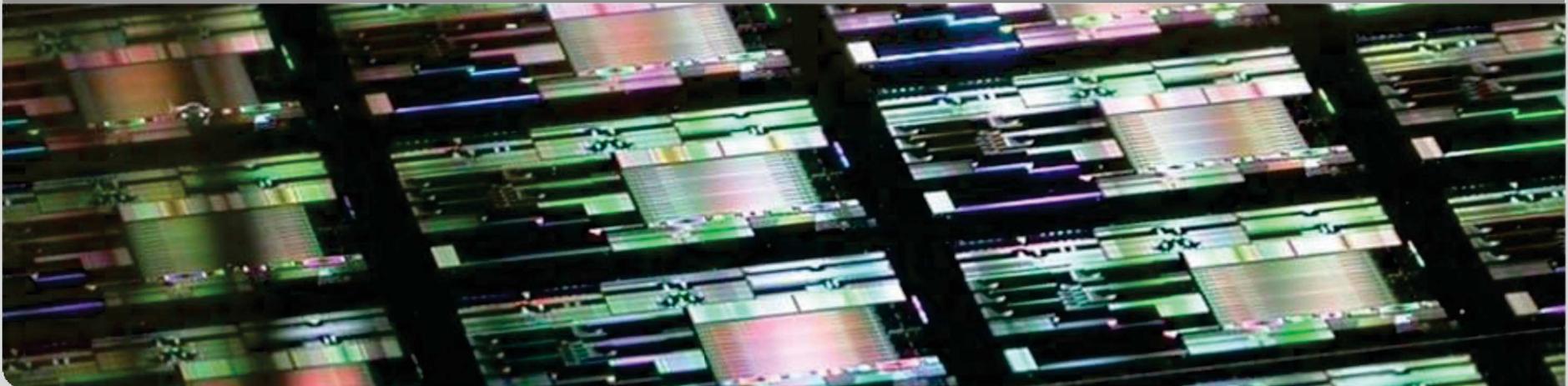


# HLB Übung 9



# Aufgabe 1) p-i-n-Diode

Eine p-i-n-Fotodiode besteht aus einem  $w_i = 10 \mu\text{m}$  langen undotierten Gebiet, das sich zwischen einem p- und n-Gebiet von jeweils  $500 \text{ nm}$  Länge befindet, siehe Figur 1. Die Akzeptor- und Donatorkonzentrationen im p- und n-Gebiet sind  $n_D = n_A = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Die Eigenleitungsträgerdichte ist  $n_i = 1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  und es gilt Störstellenerschöpfung. Der Einfluss der Metallkontakte ist vernachlässigbar. Für die RLZ in den dotierten Bereichen kann die Schottky-Näherung angenommen werden. Die Dielektrizitätskonstante des Halbleiters ist  $\epsilon_r = 12$ , und der Betrieb sei bei Raumtemperatur  $T = 300 \text{ K}$ .

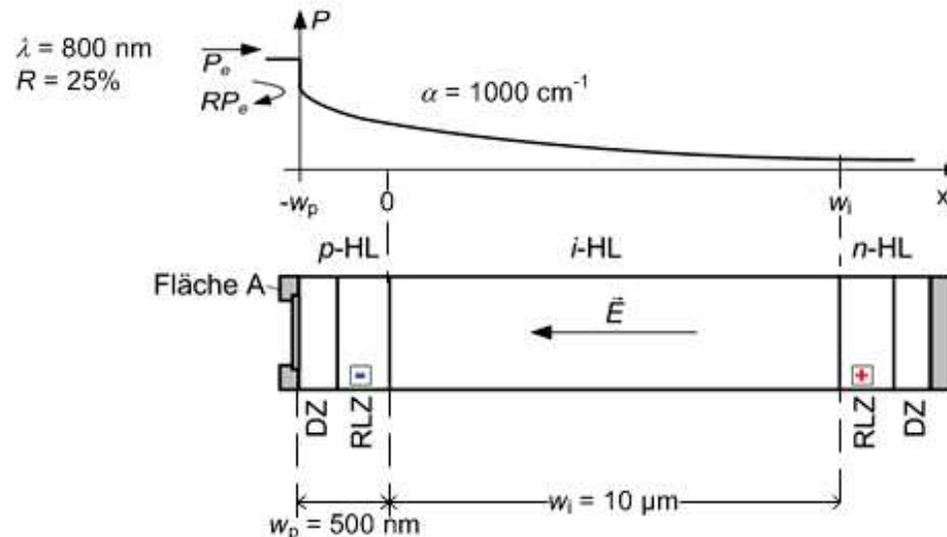
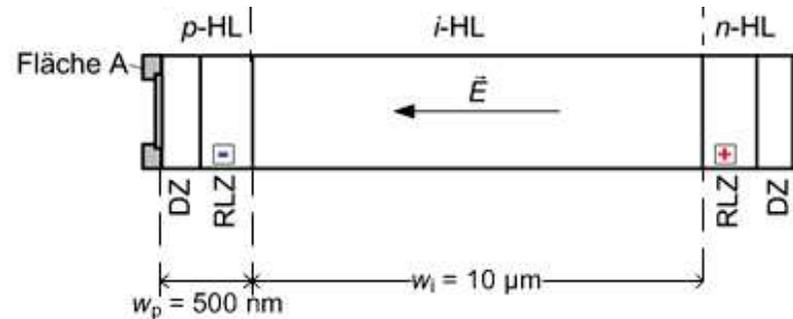


Fig 1: p-i-n-Diode. Oben: Optischer Leistungsabfall über die Tiefe. Unten: Querschnittszeichnung der p-i-n-Diode.

a) Berechnen Sie die Diffusionsspannung zwischen n- und p- Gebiet.

$$U_D = U_T \ln \left( \frac{n_A n_D}{n_i^2} \right)$$

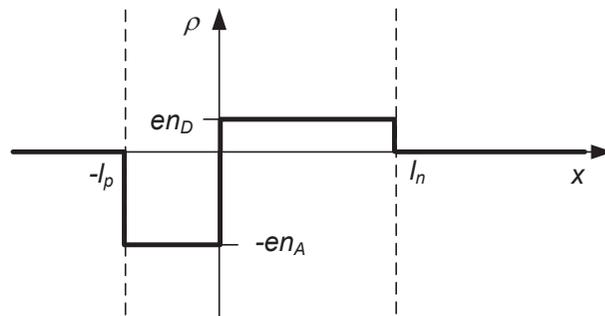
# Aufgabe 1) p-i-n-Diode



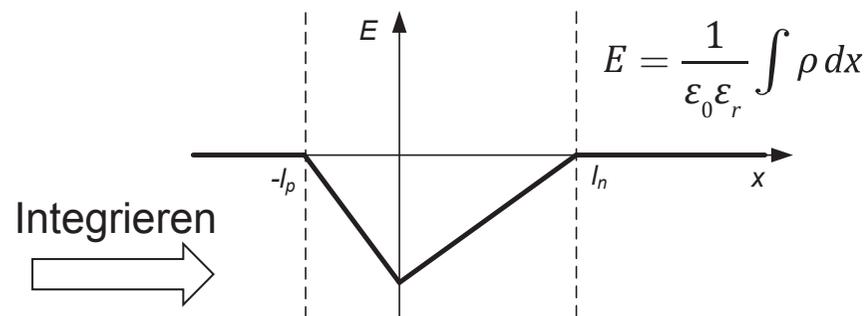
b) Leiten Sie einen formalen Ausdruck für den Verlauf des elektrischen Feldes über der Ortskoordinate  $x$  ( $x = 0$  sei am p-i-Übergang) her. Verwenden Sie dabei die zunächst noch unbekanntenen Parameter  $l_n$  und  $l_p$  für die Ausdehnungen der Raumladungszone im n- und p-Bereich. Skizzieren Sie den Verlauf des elektrischen Feldes als Funktion des Ortes  $x$ .

- Vergleich mit Vorgehensweise bei p-n-Diode

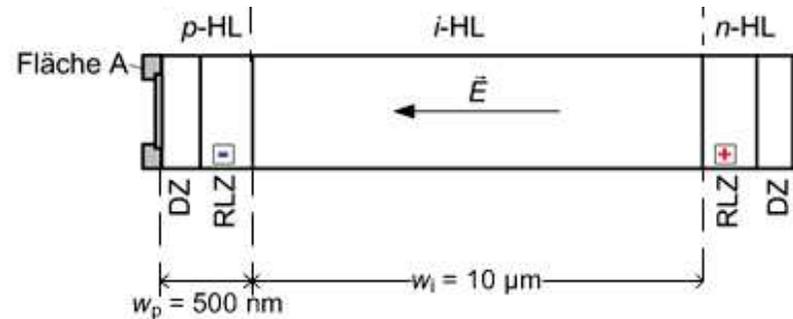
Raumladungsdichte  $\rho(x)$



Feldstärke  $E(x)$

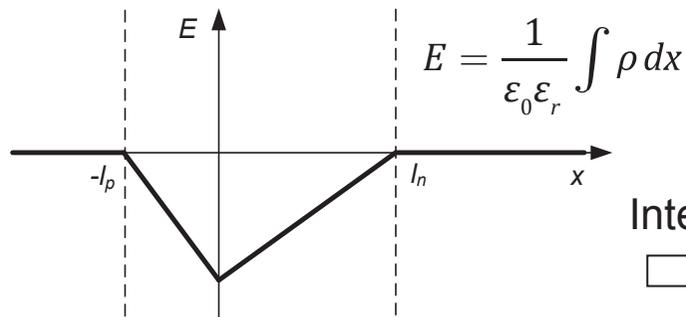


# Aufgabe 1) p-i-n-Diode

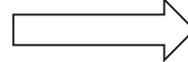


- c) Berechnen Sie die Ausdehnungen  $l_n$  und  $l_p$  der beiden Raumladungszonen in die dotierten Bereiche. Verwenden Sie dazu die in Aufgabenteil a) berechnete Diffusionsspannung  $U_D$ . Wie groß ist die maximal auftretenden Feldstärke  $E_{max}$ ?

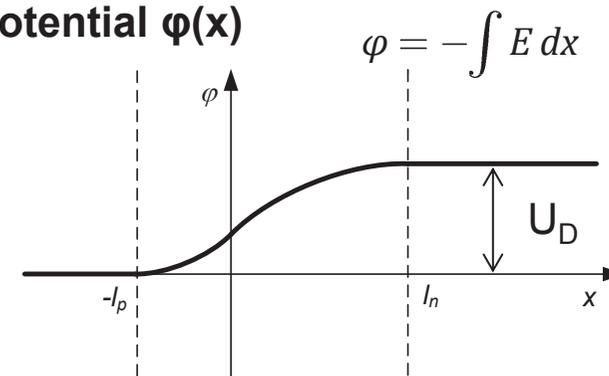
## Feldstärke $E(x)$



Integrieren

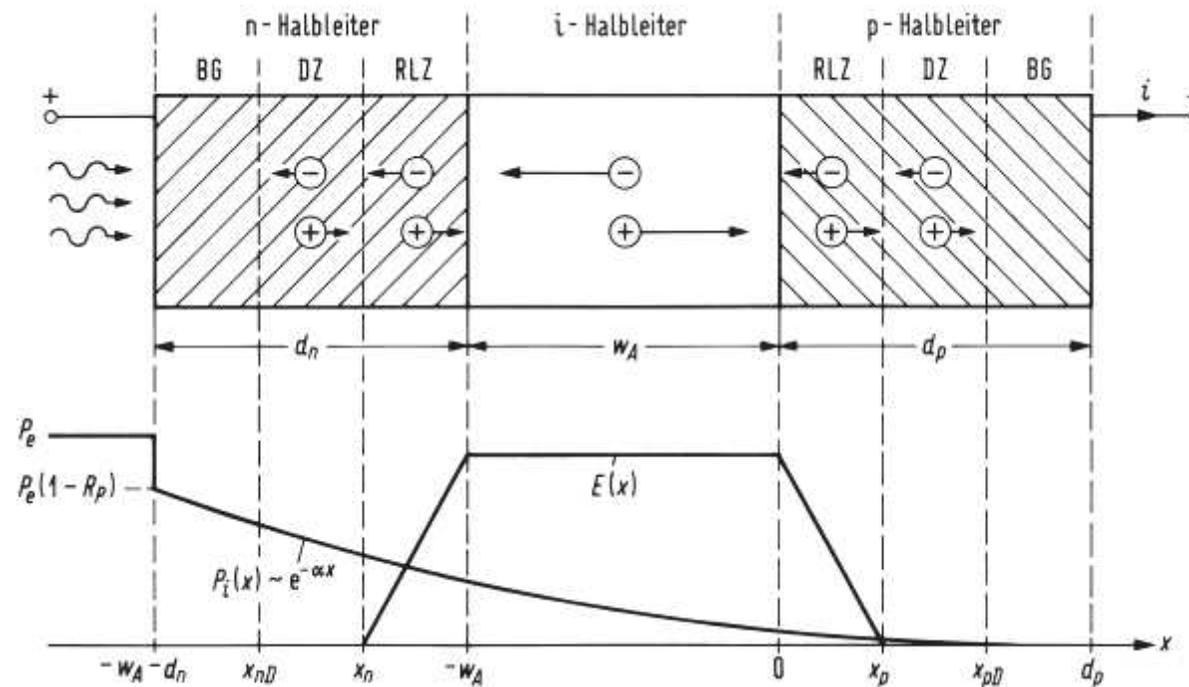


## Potential $\varphi(x)$



# Aufgabe 1) p-i-n-Diode

d) Welcher Vorteil ergibt sich für die p-i-n-Diode als Fotodiode gegenüber einer p-n-Diode ohne i-Schicht?



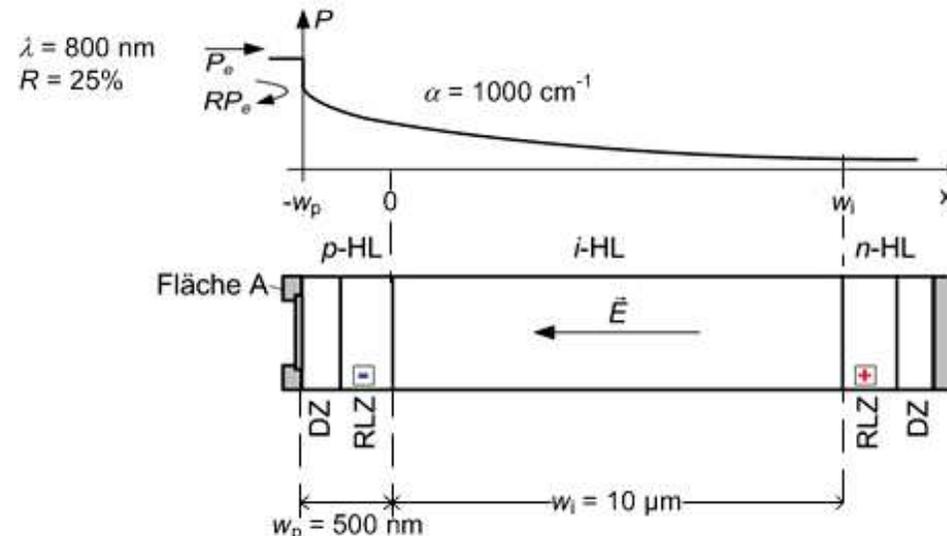
# Aufgabe 1) p-i-n-Diode

In der undotierten Zone werden durch Lichteinstrahlung mit einer externen Lichtleistung von  $P_e = 100 \mu\text{W}$  bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 800 \text{ nm}$  Ladungsträgerpaare erzeugt, so dass sich ein stationärer Strom  $I_P$  im Außenkreis einstellt. Der Absorptionskoeffizient des Materials beträgt  $\alpha = 1000 \text{ cm}^{-1}$  und der Leistungsreflektionsfaktor an der Oberfläche des Halbleiters beträgt  $R = 25\%$ .

e) Berechnen Sie den Quantenwirkungsgrad  $\eta = \frac{|I_P|/e}{P_e/hf}$  und die Empfindlichkeit

(Responsivity)  $\mathfrak{R} = \frac{|I_P|}{P_e}$  der Photodiode. Nehmen Sie dazu an, dass jedes im Innern des

Halbleiters absorbierte Photon ein Elektron-Loch-Paar erzeugt, das zum Photostrom beiträgt. Welcher Strom stellt sich bei einer einfallenden Leistung von  $P_e = 100 \mu\text{W}$  ein?



## Aufgabe 2) Varaktordiode

Varaktordioden werden als variable Kapazitäten in HF-Schaltungen eingesetzt. Dabei lässt sich der funktionale Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und HF-Kapazität durch das Dotierprofil einstellen. Im vorliegenden Fall soll eine einseitig abrupt dotierte n+p-Siliziumdiode mit hoher räumlich konstanter n-Dotierung und geringerer, räumlich variabler p-Dotierung betrachtet werden. Das Dotierprofil sei gegeben durch:

$$n_D - n_A = \begin{cases} n_D & x < 0 \\ -K \cdot \delta^{-3/2} & 0 \leq x \leq \delta \\ -K \cdot x^{-3/2} & \delta < x \end{cases}$$

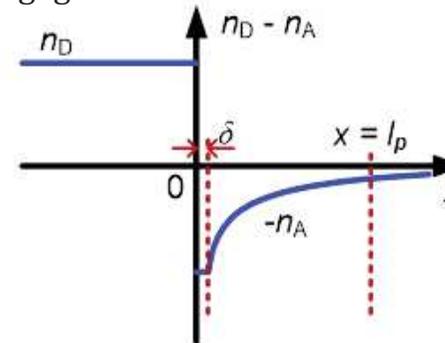


Fig. 2: Dotierprofil der Varaktor Diode

Die Diode sei in Sperrrichtung vorgespannt. Die Raumladungszone im p-dotierten Gebiet erstreckt sich bis zu  $x = l_p$ , wobei  $l = l_n + l_p$  die Länge der gesamten Raumladungszone bezeichnet. Gehen Sie davon aus, dass die Länge  $l_n$  der RLZ im  $n^+$ -Gebiet vernachlässigbar klein gegenüber der Länge  $l_p \approx l \gg \delta$  im p-Gebiet ist. Verwenden Sie im Folgenden die Schottky-Näherung und gehen Sie davon aus, dass Störstellenerschöpfung gilt.

- a) Bestimmen Sie die ortsabhängige Feldstärke  $E(x)$  im Bereich  $\delta < x \leq l$ . Nutzen Sie dabei die Tatsache, dass das E-Feld außerhalb der Raumladungszone verschwindet, d.h.  $E(x) = 0$  für  $x > l$ .

$$\rho = e(p - n + n_D^+ - n_A^-)$$

$$E = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \int \rho dx$$

# Aufgabe 2) Varaktordiode

$$n_D - n_A = \begin{cases} n_D & x < 0 \\ -K \cdot \delta^{-3/2} & 0 \leq x \leq \delta \\ -K \cdot x^{-3/2} & \delta < x \end{cases}$$

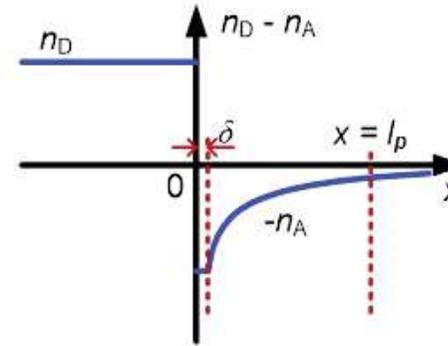


Fig. 2: Dotierprofil der Varaktor Diode

- b) Bestimmen Sie das ortsabhängige elektrische Potential  $\varphi(x)$  im Bereich  $\delta < x \leq l$ . Es soll  $\lim_{\delta \rightarrow 0} \varphi(\delta) = 0$  gelten. Zeigen Sie, dass für das Potential  $\varphi(l)$  am rechten Rand folgende Beziehung gilt:

$$\varphi(l) = -\frac{2eK}{\epsilon_0 \epsilon_r} \sqrt{l}$$

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

- c) Das Potential am rechten Rand der Raumladungszone entspricht der Differenz zwischen der angelegten Spannung  $U$  und der Diffusionsspannung  $U_D$ ,  $\varphi(l) = U - U_D$ . Berechnen Sie daraus die Sperrschichtkapazität  $C_s = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{l}$  in Abhängigkeit von  $U_D - U$ .

- d) Berechnen Sie die Resonanzfrequenz eines Reihenschwingkreises bestehend aus einer Induktivität  $L$  und einer in Sperrrichtung vorgespannten Varaktordiode mit der Sperrschichtkapazität  $C_s$  in Abhängigkeit von  $U_D - U$ .

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC_s}}$$