

Übungen zu Experimentelle Methoden (der Teilchenphysik) SS 2014  
 Prof. Karl Jakobs, Dr. Susanne Kühn, Daniel Büscher  
 Übungsblatt Nr. 4

**Die Lösungen müssen bis 12 Uhr am Montag, 2.6.2014 in Briefkasten Nr. 1  
 im Erdgeschoss des Gustav-Mie-Hauses eingeworfen werden!**

---

**1. Photomultiplier**

Photomultiplier werden zur Signalsammlung benutzt. Übliche Modelle habe 14 Dynoden und werden bei einer Beschleunigungsspannung von 200 V betrieben. Ein gewöhnlicher Verstärkungsfaktor beträgt 4. Berechnen Sie die Signalhöhe in Volt für ein, drei und fünf Eingangselektronen. Die Laufzeit sei mit 5 ns anzunehmen und der Endwiderstand ist  $50 \Omega$ . Der spezifische Widerstand von Silizium kann mit  $\rho = 0,625 \times 10^9 \Omega \text{mm}^2/m$  angenommen werden. **[2 Punkte]**

**2. Leitfähigkeit in Silizium**

Es soll die Leitfähigkeit für intrinsisches und dotiertes Silizium betrachtet werden.

- Berechnen Sie die Spannung, die Sie bei 300 K an einen rechteckigen Stab aus intrinsischem Silizium anlegen müssen, um einen Strom von 100 nA fließen zu lassen. Der Querschnitt des Stabes ist  $10 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$  und seine Länge sei 1 mm. **[2 Punkte]**
- Berechnen Sie zusätzlich die benötigten Spannungen nachdem der Stab mit Donatoratomen mit folgenden Dichten dotiert wurde:  $N_{D,1} = 10^9 \text{cm}^{-3}$  und  $N_{D,2} = 10^{12} \text{cm}^{-3}$ . Die Beweglichkeit  $\mu$  der Ladungsträger sei mit  $2 \times 10^4 \text{cm}^2/(\text{Vs})$  angenommen. **[2 Punkte]**

**3. Siliziumdetektoren**

Siliziumdetektoren eignen sich sehr gut zur präzisen Ortsbestimmung geladener Teilchen. In Abbildung 1 ist eine schematische Zeichnung eines Streifensensors dargestellt.

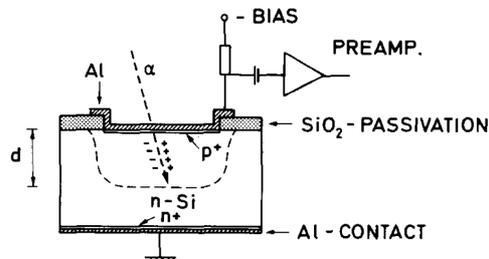


Abbildung 1: Schematische Zeichnung eines p-in-n Streifensensors nach Kemmer.

- Bei Kontakt der p-dotierten Streifen und des n-dotierten Siliziumsubstratmaterials bildet sich durch Diffusion von Löchern vom p-dotierten ins n-dotierte Silizium und die Bewegung freier Elektronen aus dem n-dotierten Silizium ein elektrisches Feld im pn-Übergang aus. Die auftretende Spannung wird als Diffusionsspannung  $U_D$  bezeichnet. Sie ist definiert durch:

$$U_D = \frac{k_B \cdot T}{e} \ln \frac{N_{\text{Akzeptor}} \cdot N_{\text{Donator}}}{n_i^2}, \quad (1)$$

mit  $k_B$  der Boltzmannkonstanten und  $e$  der Elementarladung. Berechnen Sie die Diffusionsspannung unter der Annahme  $N_{\text{Akzeptor}} = 1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  die Anzahl an Akzeptoren und  $N_{\text{Donator}} = 1 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$  die der Donatoren im n-dotierten Bereich,

sowie  $T = 300 \text{ K}$  und  $n_i = 15 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  die Anzahl intrinsischer Ladungsträger. [2 Punkte]

Bitte wenden.

- Durch Anlegen einer Spannung in Sperrrichtung zwischen den p-dotierten Streifen und dem n-dotierte Siliziumsubstratmaterial, wird das elektrische Feld vergrößert und kann sich auf den gesamten Sensor ausbreiten und diesen verarmen, d.h. es gibt keine freien Ladungsträger mehr. Für den Zusammenhang von extern angelegter Spannung  $U$  und Dicke der Verarmungszone  $d$  gilt:

$$d(U) = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0}{e} \left( \frac{1}{N_{\text{Akzeptor}}} + \frac{1}{N_{\text{Donator}}} \right) (U_D + U_{FD})}, \quad (2)$$

wobei  $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-14} \text{ C}/(\text{Vcm})$  die Permittivität des Vakuums und  $\varepsilon_r = 11,7$  die relative Permittivität ist.

In welche Richtung muss dazu die Spannung an p- und n-Schicht angelegt werden und wie groß muss sie zur vollständigen Verarmung eines  $300 \mu\text{m}$  dicken Sensors sein? Skizzieren Sie zusätzlich den Verlauf des elektrischen Feldes. [4 Punkte]

- Der vollständig verarmte Siliziumdetektor eignet sich hervorragend zur Detektion geladener Teilchen. Minimalionisierende Teilchen erzeugen im verarmten Bereich Elektronen-Loch-Paare, die im elektrischen Feld driften und an den Streifen als Ladungssignal ausgelesen werden können. Berechnen Sie die durch ein minimalionisierendes Teilchen (MIP) im verarmten Detektorbereich erzeugte Anzahl an Elektronen-Loch-Paaren. Nehmen Sie an, daß  $3,6 \text{ eV}$  im Mittel zur Erzeugung eines Elektronen-Loch-Paares notwendig sind und der Energieverlust von MIPs  $1,5 \text{ MeV}/(\text{g cm}^{-2})$  ist. Die Dichte von Silizium ist  $\rho = 2,33 \text{ g/cm}^3$ . [3 Punkte]