

A: Detektoren für Teilchenstrahlung

(Prof. Dr. O. Biebel)

geplante Themen der Vorlesung:

1. Einleitung, Motivation

- (a) Quellen: Radioaktivität, Beschleuniger, kosmische (solare, galaktische, extragalaktische) Quellen von Teilchenstrahlung
- (b) Aufgaben: Nachweis von Strahlung, Dosismessung, Orts-, Zeit-, Energie- und Impulsmessung, Teilchenidentifikation
- (c) Methoden: Teilchenphysik, Elektrodynamik, Optik, Atomphysik, Festkörper- und Halbleiterphysik, Transporttheorie, analoge und digitale Elektronik, anorganische und organische Chemie
- (d) Einsatzgebiete: Medizin, Werkstoffkunde, Geophysik, Teilchenphysik, ...

2. Wechselwirkung zwischen Teilchen und Materie:

- (a) Elementarteilchen, Wechselwirkungen & typ. Wechselwirkungsstärken
- (b) (schwere) geladene Teilchen: Energieverlust durch inelast. Streuung, Ionisation, Bethe-Bloch-Formel, Čerenkov-Effekt, Übergangsstrahlung, Landau-Verteilung, δ -Elektronen
- (c) Elektronen, Positronen: Bremsstrahlung, Strahlungslänge
- (d) Photonen: Photoeffekt, Compton-Effekt, Paarbildung, Strahlungslänge
- (e) Neutronen: Kerneinfang, Kernreaktionen, elastische & inelastische Streuung, Moderation
- (f) Neutrinos: elastische Streuung, NC- & CC-Reaktionen
- (g) Vielfachstreuung geladener Teilchen: Coulomb-Streuung

3. Prinzipien von gasgefüllten Teilchendetektoren:

- (a) Ionisation: Mechanismen, mittlere Anzahl erzeugter Elektron-Ion-Paare
- (b) Transport freier Elektronen&Ionen: Drift und Beweglichkeit, Diffusion (feldfrei), Rekombination, Elektronanlagerung
- (c) Elektronendrift und -diffusion in Feldern: elektr. Felder, elektr.+magn. Feldern,
- (d) Ionisationsverstärkung im Gas

4. Prinzipien von Flüssigkeits-Teilchendetektoren

- (a) Ionisation und Transport

5. Prinzipien von Halbleiter-Detektoren:

- (a) Funktionsprinzip von Halbleitern: Bandstruktur, Dotierung, Ladungsträgerdichten, Beweglichkeit, Rekombination und Trapping
- (b) Halbleiterdioden: pn-Übergang, Depletierungstiefe, Kapazität
- (c) Ionisation: Mechanismen, mittlere Anzahl erzeugter Elektron-Ion-Paare
- (d) Betrieb: Bias-Spannung, Signalverstärkung, Temperatureffekte, Strahlungsschäden

Prinzipien von Halbleiterdetektoren

Detektoren, die aus Festkörpern aufgebaut sind, nutzen i.W. den Stimulationsmechanismus (folgt später) oder basieren auf Halbleitern. Aufgrund der Energielücke $E_g \approx 1\text{eV}$, die zwischen Valenz- und Leitungsband im Halbleiter vorliegt, existieren nur relativ wenig freie Ladungsträger im Leitungsband/Valenzband. Eine Rechnung ergibt für die Ladungsträgerkonzentration:

$$n_i = \text{const.} \cdot T^{3/2} \cdot \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right]$$

wobei dies sowohl für die Elektronen als auch für die Löcher gilt. (NB. Gegenüber metallischen Leitern weisen Halbleiter einen negativen Temperaturkoeffizienten auf, d.h. die Leitfähigkeit nimmt wegen der wachsenden Ladungsträgerkonzentration mit steigender Temperatur zu und damit der Widerstand ab). Die elektrische Leitfähigkeit σ hängt von der Ladungsträgerkonzentration $n_i = n_{\text{Elektron}} = n_{\text{Loch}}$ und der Beweglichkeit μ von Elektronen und Löchern ab:

$$\sigma = e \cdot n_i \cdot (\mu_e + \mu_h)$$

→ spezifischer Widerstand

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e \cdot n_i \cdot (\mu_e + \mu_h)}$$

Prinzipien von Halbleiter (Detektoren)

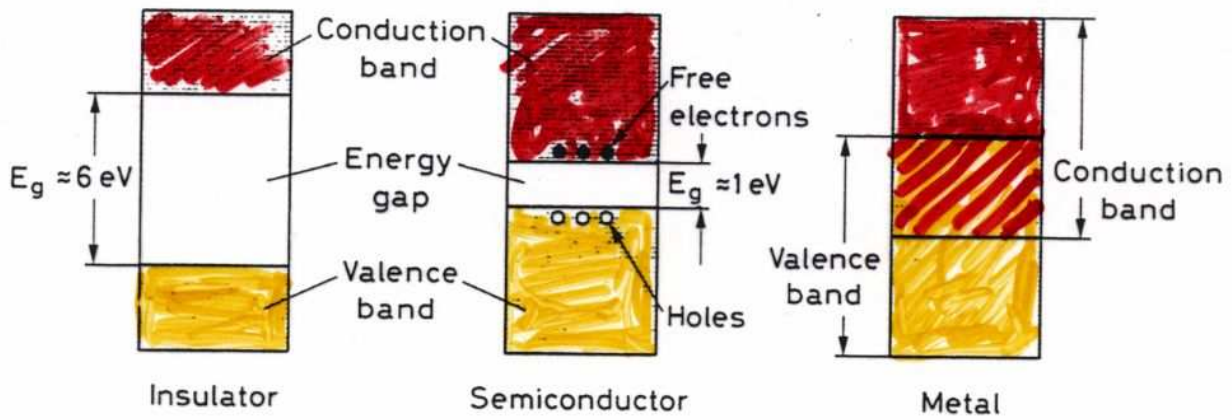


Fig. 10.1. Energy band structure of conductors, insulators and semiconductors

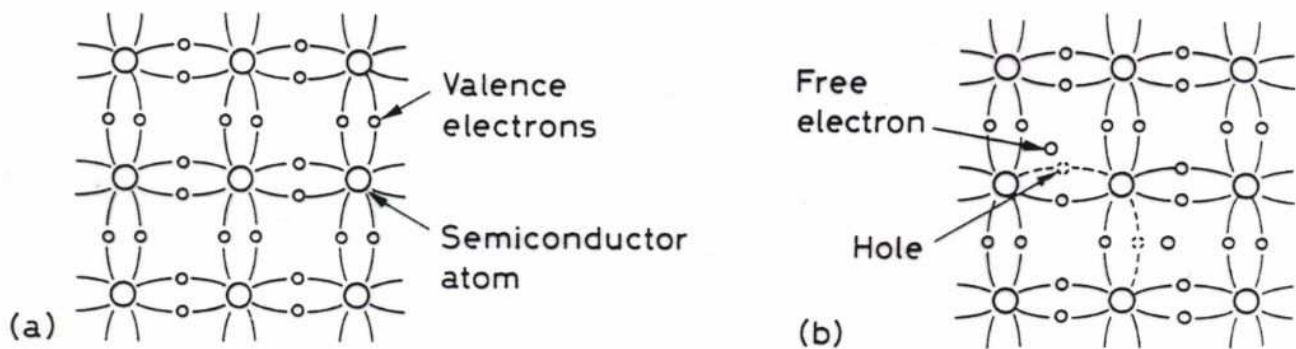


Fig. 10.2. Covalent bonding of silicon: (a) at 0 K, all electrons participate in bonding, (b) at higher temperatures some bonds are broken by thermal energy leaving a *hole* in the valence band

Atomic number	14
Atomic weight	28.08
Atoms	$4.99 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$
Density	2.33 g/cm^3
Dielectric constant	11.7
<u>Gap energy</u>	1.11 eV
Effective density of states	
conduction band	$2.8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
valence band	$1.04 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
<u>Electron mobility</u>	$1350 \text{ cm}^2/(\text{V s})$
<u>Hole mobility</u>	$480 \text{ cm}^2/(\text{V s})$
Electron diffusion constant	$34.6 \text{ cm}^2/\text{s}$
Hole diffusion constant	$12.3 \text{ cm}^2/\text{s}$
<u>Intrinsic carrier density</u>	$1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
<u>Intrinsic resistivity</u>	$235 \text{ k}\Omega\text{cm}$
Melting point	$1415 \text{ }^\circ\text{C}$
Thermal expansion coefficient	$2.5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Breakdown field	$30 \text{ V}/\mu\text{m}$

Table 1: The physical properties of silicon at room temperature.

Prinzipien von Halbleiterdetektoren

Die elektrischen Eigenschaften eines Halbleiters können durch gezielte Verunreinigung (Dotierung) mit Donatoren (5wertige Elemente) und Akzeptoren (3wertige Element) verändert werden, indem durch diese Verunreinigungen zusätzliche Energieniveaus in der Bandlücke des Halbleiters geschaffen werden. Unabhängig von der Dotierung sind durch das Massenwirkungsgesetz im thermischen Gleichgewicht die Konzentrationen von Elektronen n und Löchern p verknüpft:

$$n \cdot p = n_i^2 = \text{const} \cdot T^3 e^{-E_g/kT}$$

und die elektrische Neutralität des Halbleiters fordert:

$$N_D + p = N_A + n$$

für Akzeptor-/Donatorkonzentration N_A/N_D .

Ist also der Majoritätsladungsträger das Elektron*, d.h. $n \gg p$,

so folgt $p \approx n_i^2/N_D$ für den Minoritätsladungsträger

und somit für den spezifischen Widerstand:

$$\frac{1}{\rho_n} = \sigma \approx e \cdot N_D \cdot \mu_e$$

Und entsprechend analog, falls die Löcher** den Majoritätsladungsträger darstellen.

* n-Dotierung

** p-Dotierung

Prinzipien von Halbleiter(detektoren)

• Dotierung:

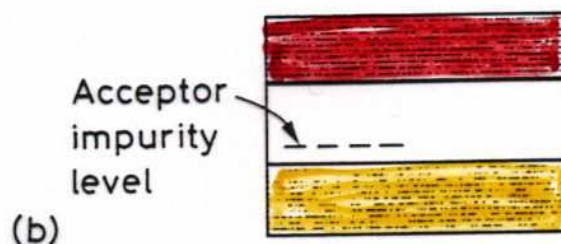
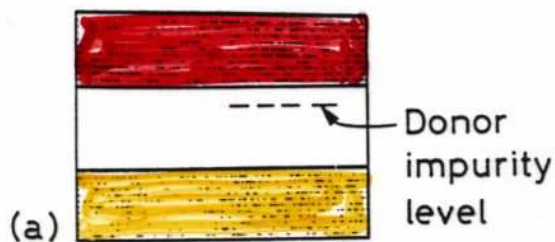
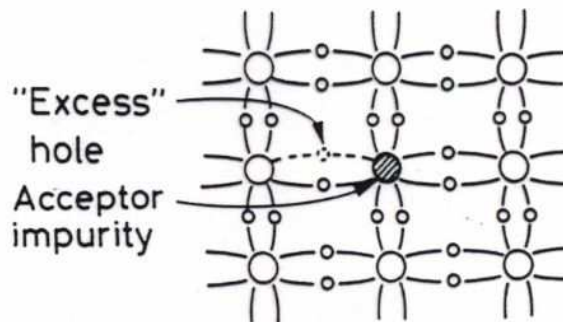
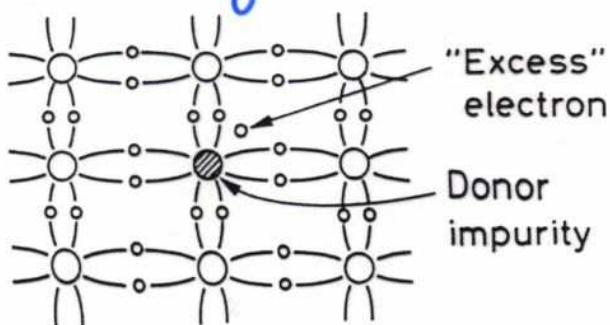


Fig. 10.4. (a) Addition of donor impurities to form n-type semiconductor materials. The impurities add excess electrons to the crystal and create donor impurity levels in the energy gap. (b) Addition of acceptor impurities to create p-type material. Acceptor impurities create an excess of holes and impurity levels close to the valence band

• Der pn-Übergang:

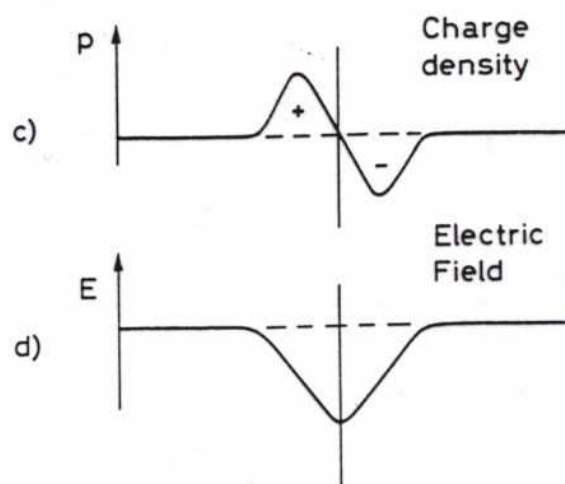
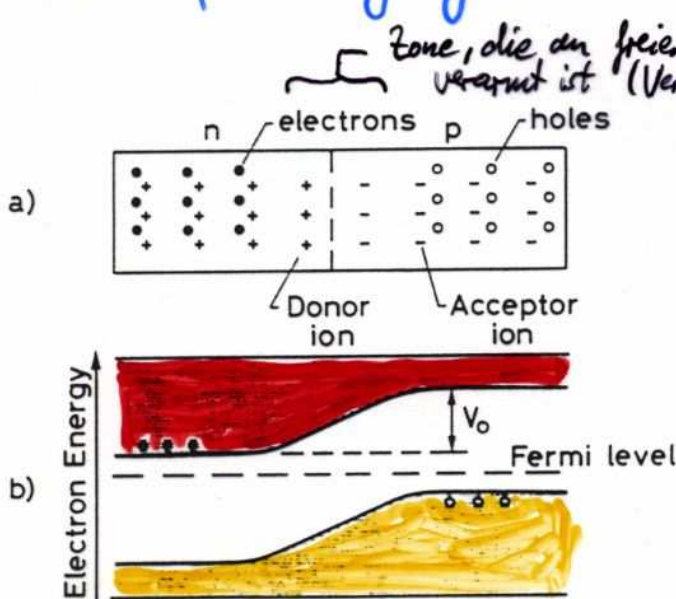


Fig. 10.5. (a) Schematic diagram of an np junction, (b) diagram of electron energy levels showing creation of a contact potential V_0 , (c) charge density, (d) electric field intensity

- ⊖ Acceptor ion
- ⊕ Donor ion
- + Hole
- Electron

THE PN JUNCTION

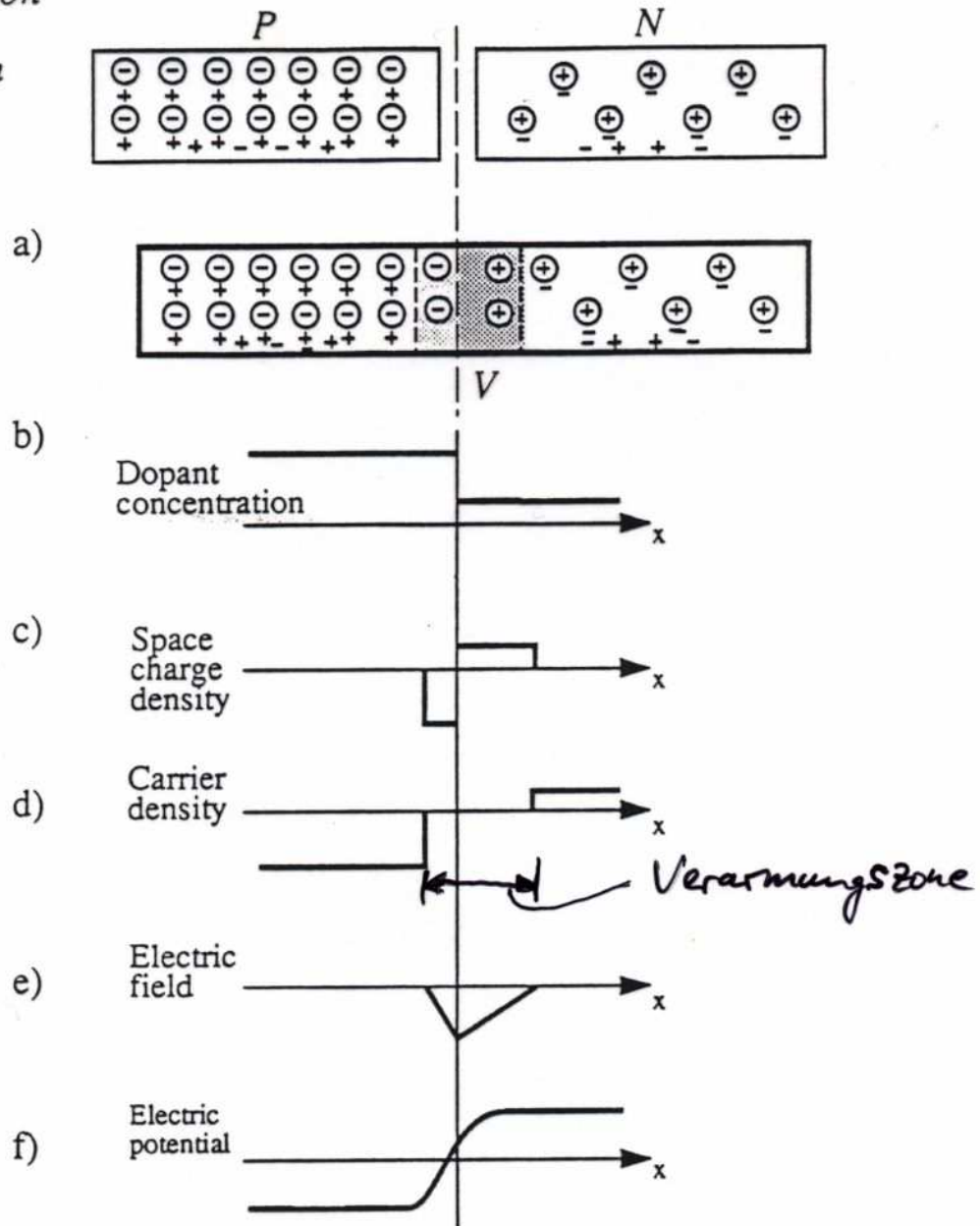


Figure 1: The p-n junction. a) Two crystals of opposite type are brought together and a depletion layer is formed on either side of the junction. b) The dopant concentration. c) Net space charge density showing zero charge except for a dipole layer at the junction. d) Electrons and holes density through the crystal showing no free carriers in the depleted zones. e) Electric field distribution. It is maximum at the junction and zero outside the depletion regions. f) The potential distribution within the depletion region.

Prinzipien von Halbleiterdetektoren

Von Bedeutung für den Teilchennachweis ist die Verarmungszone. Werden durch ionisierende Strahlung dort Elektron-Lochpaare erzeugt, so werden diese im \vec{E} -Feld der Raumladung getrennt und führen zu einem Strom durch den pn-Übergang. Die Dicke der Raumladungs- bzw. Verarmungszone kann leicht berechnet werden. Es ergibt sich:

$$d = \sqrt{\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \cdot \frac{2}{e} \cdot \epsilon \cdot V_0} = x_n + x_p$$

wobei V_0 das Kontaktpotential und ϵ die Dielektrizitätskonst. sind

Die Ausdehnung der Verarmungszone in die n- / p-Dotierung sind

$$x_n = \sqrt{\frac{2 \epsilon V_0}{e N_D (1 + N_D / N_A)}}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2 \epsilon V_0}{e N_A (1 + N_A / N_D)}}$$

Für den Fall $N_A \gg N_D$ wird $d \approx x_n = \sqrt{\frac{2 \epsilon V_0}{e N_D}}$ und mit Benutzung des spezifischen Widerstands $\frac{1}{S_n} \approx e N_D \mu_e$ folgt:

$$d \approx \sqrt{2 \epsilon S_n \cdot \mu_e \cdot V_0}$$

z.B. für Silizium:

$$d \approx \begin{cases} 0.53 (S_n \cdot V_0)^{1/2} \text{ } \mu\text{m} \\ 0.32 (S_p \cdot V_0)^{1/2} \text{ } \mu\text{m} \end{cases}$$

n-Dotierung

p-Dotierung

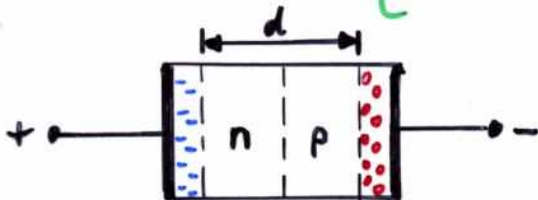
$$([S] = S \text{ cm}, [V_0] = V)$$

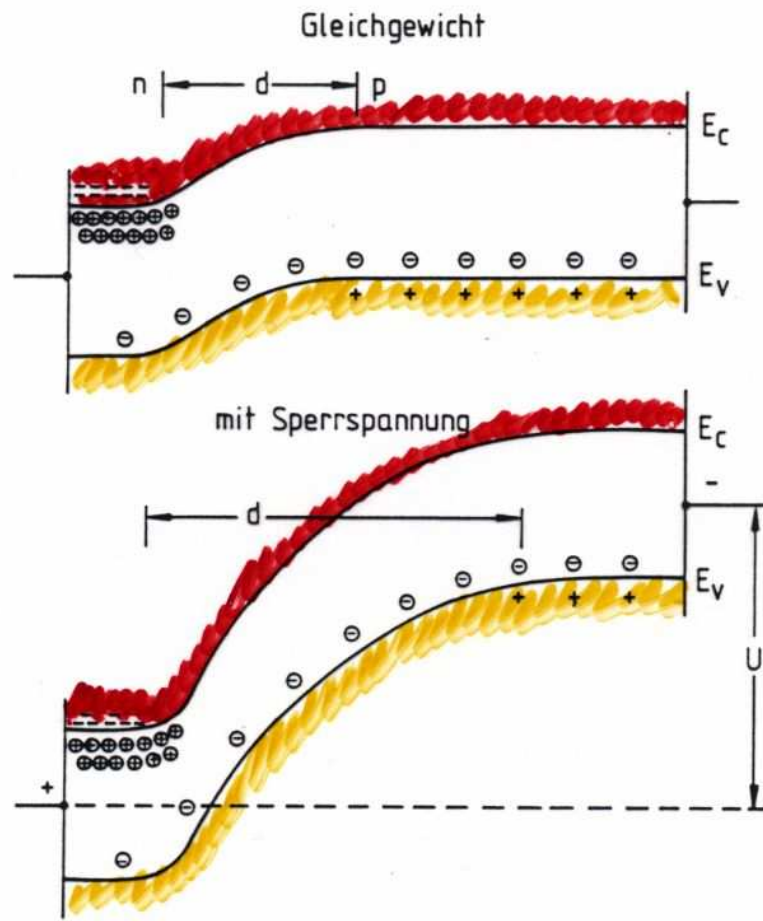
Prinzipien von Halbleiterdetektoren

Durch Anlegen einer Sperrspannung (reverse bias voltage) kann die Dicke der Verarmungszone und damit das sensitive Volumen für den Teilchennachweis vergrößert werden. Die maximale Dicke wird durch die Abmessung des Halbleiters bestimmt. Üblicherweise werden Halbleiterdetektoren mit völlig verarmter Raumladungszone betrieben. Die dafür benötigte Sperrspannung, die einige 100 Volt betragen kann, kann ~~experimentell~~ ^{experimentell} aus der Verarmungszonenkapazität bestimmt werden:

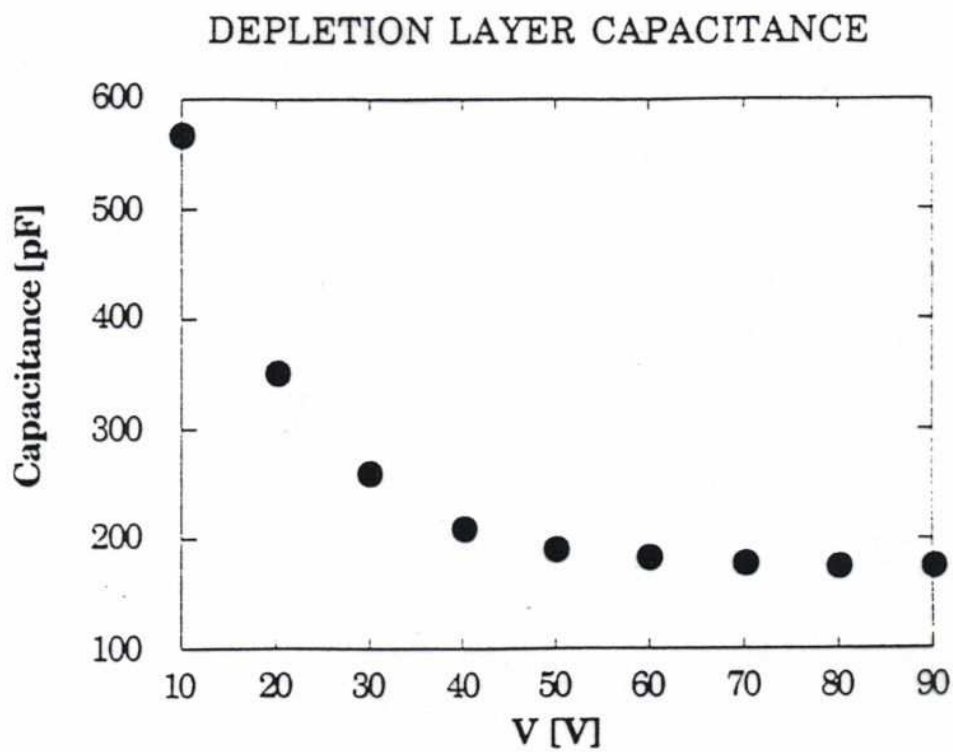
- **Leckstromsättigung**: Wenn alle freien Ladungsträger am Stromtransport beteiligt sind, kann der Strom trotz wachsender Spannung nicht weiter ansteigen. (Leckstromquellen: Gitterfehler, Oberflächenströme, Strahlungsschäden)
- **Sperrschichtkapazität**: Die verarmte Raumladungszone stellt ein Dielektrikum zwischen zwei leitenden Schichten dar. Die Kapazität dieses ^{Platten-}Kondensators ist: $C = \epsilon \cdot \frac{A}{d}$ und mit der Dicke der Verarmungszone folgt für Silizium:

$$C = \begin{cases} 2.2 (s_n \cdot V_0)^{1/2} & \text{pF/mm}^2 & \text{n-Dotierung} \\ 3.7 (s_p \cdot V_0)^{1/2} & \text{pF/mm}^2 & \text{p-Dotierung} \end{cases}$$





Bandstruktur eines unsymmetrischen p-n-Übergangs; d Dicke der Verarmungszone, E_c untere Grenze des Leitungsbandes, E_v obere Grenze des Valenzbandes, U Sperrspannung, nach [BR 61].



$$C \sim \frac{1}{\sqrt{V_n V_0}}$$

Figure 4: Depletion layer capacitance as a function of the applied voltage measured on a detector with a surface of about 4.5 cm².

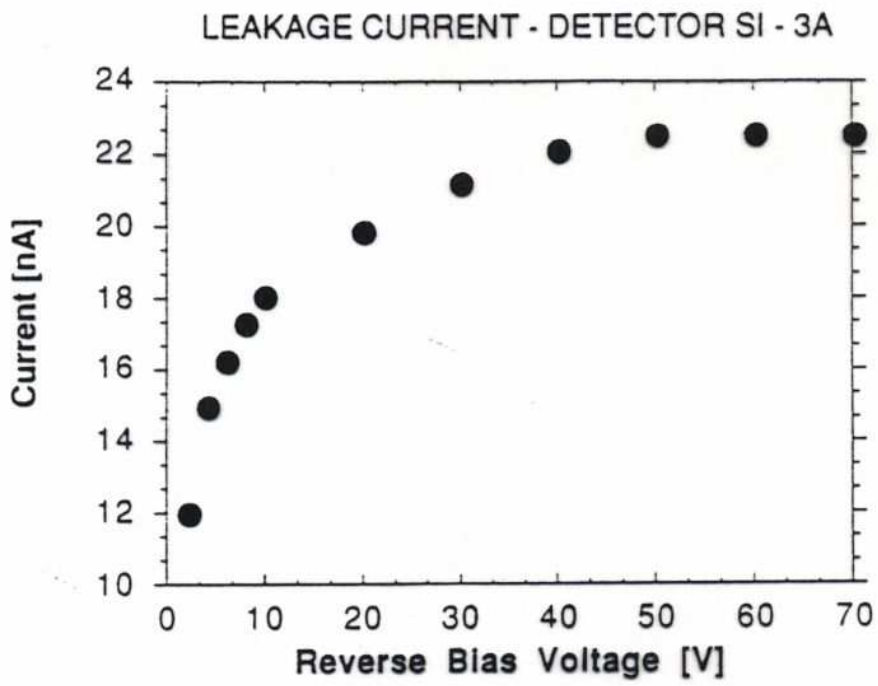
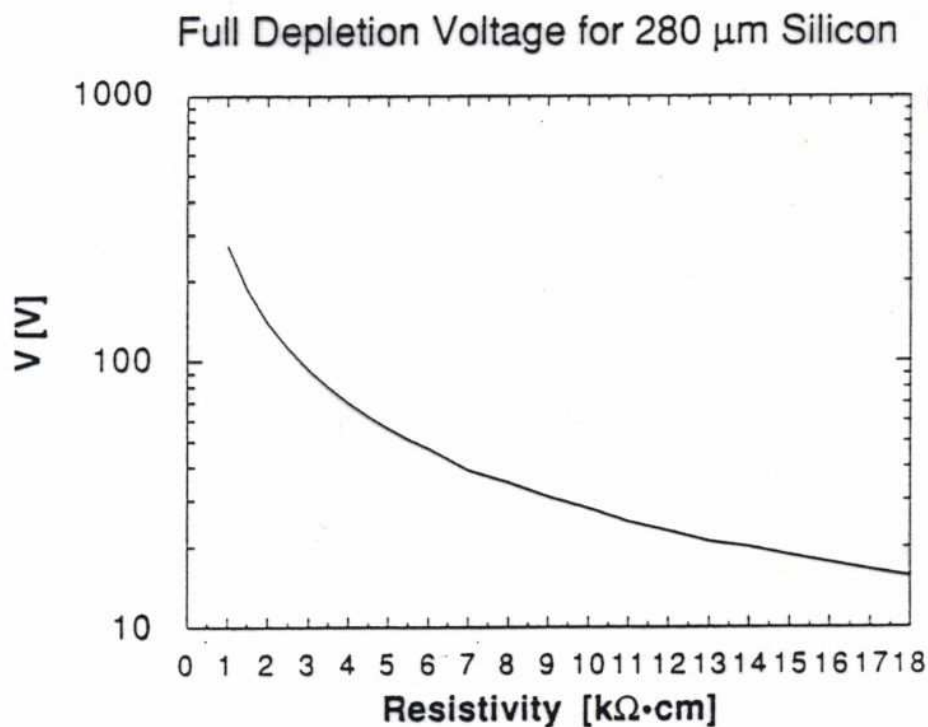


Figure 2: Silicon diode leakage current as a function of the reverse voltage measured on a detector of a surface of 2.5 cm².



$d \sim \sqrt{S_n \cdot V_0}$
 $V_0 \sim d^2 / S_n$
und $\frac{1}{S_n} \sim N_D$

Figure 3: Reverse bias voltage necessary to fully deplete 280 μm of silicon.

Prinzipien von Halbleiterdetektoren

Die geringe Energie zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares stellt einen der wichtigen Vorteile von Halbleiter- gegenüber Gasdetektoren dar. In Silizium werden ca. 3.6 eV pro Elektron-Loch-Paar benötigt (≈ 10 mal weniger als im Gas). Bei Totalabsorption der Energie eines Teilchens werden also viel mehr Ladungsträger erzeugt. Da die Auflösung der Energiemessung proportional zu $\frac{1}{\sqrt{N}}$, der Zahl der Ladungsträger N ist, lässt dies eine gute Energiemessung erwarten. Zudem ist der Fano-Faktor $F \approx 0.1$ für Halbleiter und verbessert die Energieauflösung zusätzlich.

Meist werden Halbleiterdetektoren auch zur Ortsmessung benutzt, insbesondere weil die mögliche Mikrostrukturierung sehr gute Ortsmessgenauigkeiten möglich macht.

Problematisch sind Strahlungsschäden, die zu Gitterfehlstellen, Aufladungseffekten an Isolatoren (SiO_2 -Abdeckungen) und auch zu Typumwandlung ($n + {}^{28}\text{Si} \rightarrow {}^{29}\text{P} + X$) führen können. An LHC erwartet man, dass n-dotierte Halbleiter sich durch Strahlungsbedingte Störstellen in p-typen umwandeln. Um die Auswirkungen dieser Schäden zu minimieren, müssen Halbleiterdetektoren bei LHC auf -10°C bleiben.

Prinzipien von Halbleiterdetektoren

Ortsmessung:

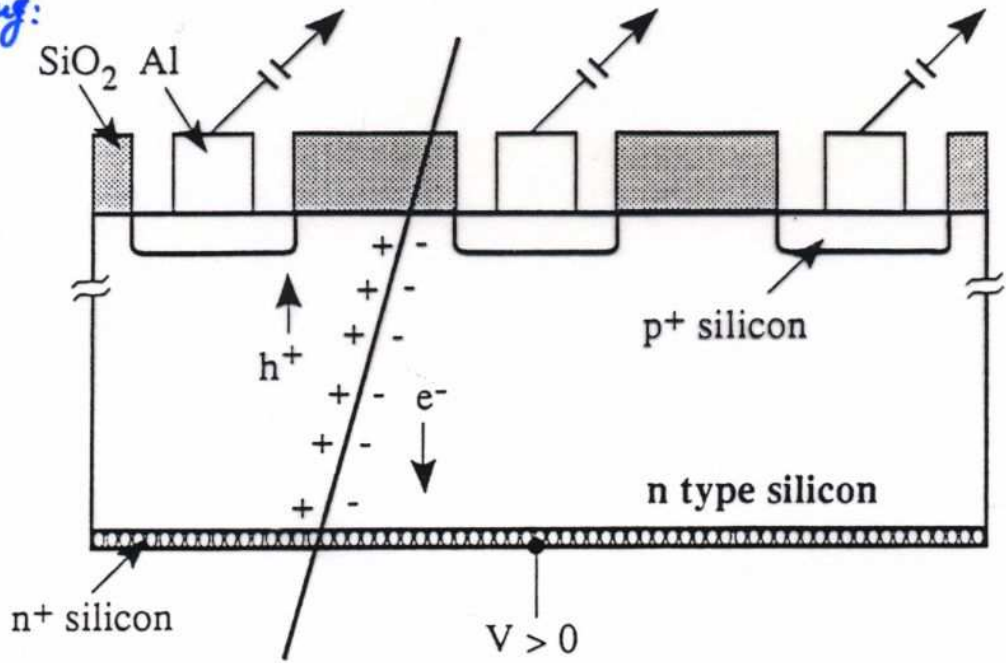


Figure 5: Schematic of a silicon particle detector.

Magnetfeldeinfluss:

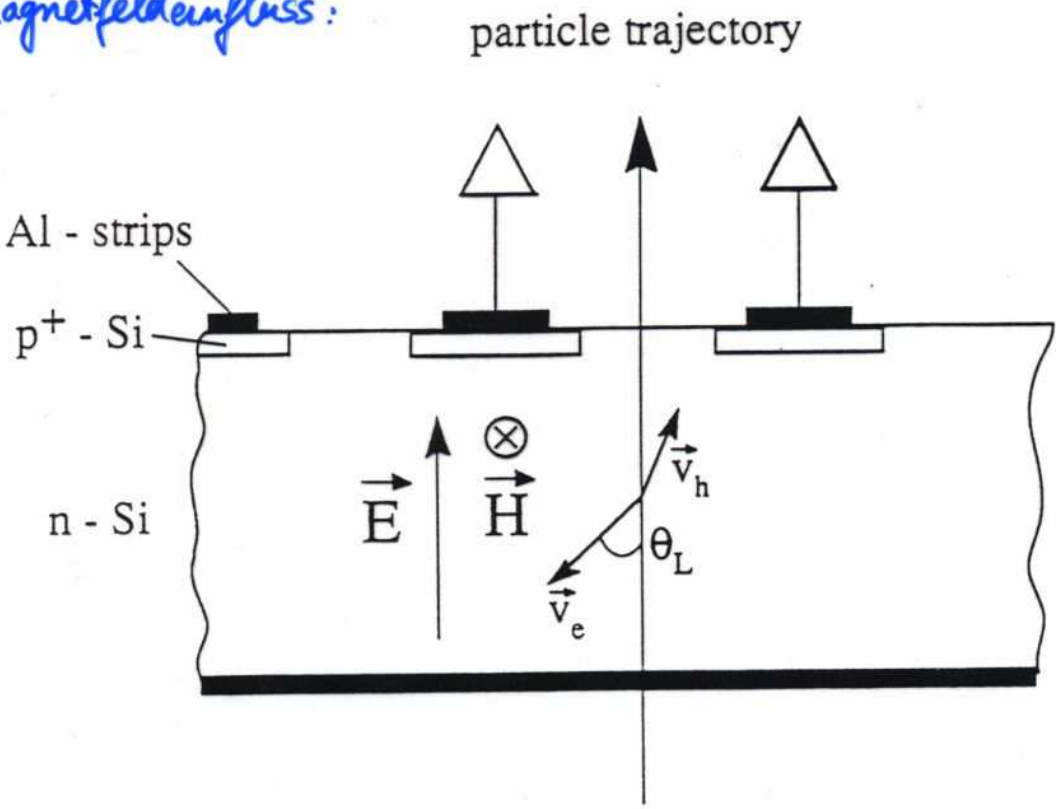
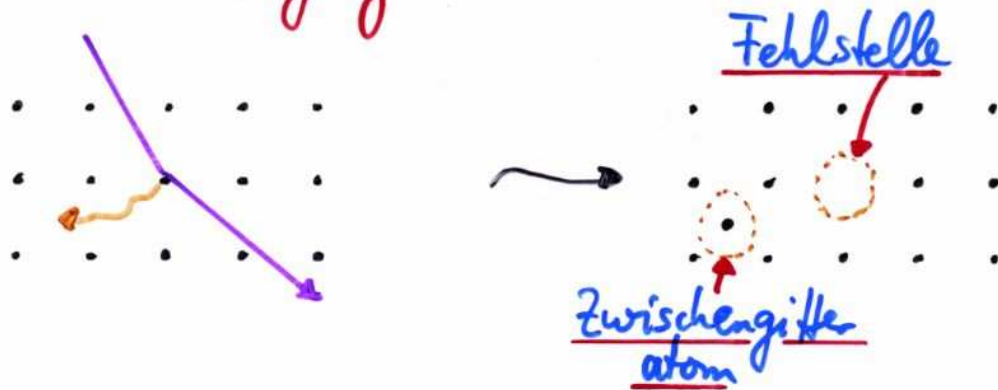


Figure 22: Silicon microstrip detector in a magnetic field.

Strahlungsschäden bei Halbleiter(-detektoren)

• Bulk-Schädigung ...



... führt zu

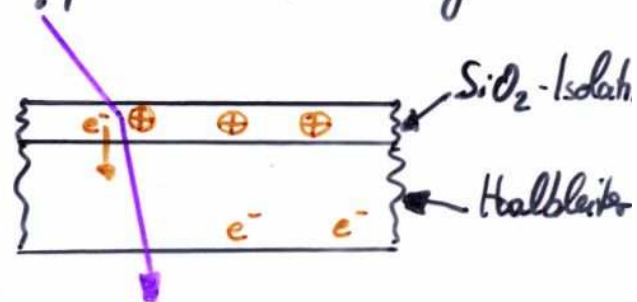
- ▶ erhöhtem Leckstrom (Fehlstelle, Zwischengitteratom erzeugen Elektron-Lochpaar bei therm. Energie)
- ▶ Ladungsträgerfallen (z.B. ein Elektron in Fehlstelle gefangen)
- ▶ Aufbau von Raumladung (z.B. wegen Ladungsträgerfallen)
- ▶ Atomverlagerung kann Kette weiterer Verlagerungen auslösen → Cluster von Schädigung

Bulk-schäden hängen sowohl von Teilchentyp als auch -Energie ab

• Oberflächen-Schädigung

führt zu

- ▶ Ladungsaufbau in Oberfläche wie z.B. Isolation,
- ▶ erhöht Oberflächenleckströme



Oberflächenschäden sind proportional zur absorbierten Energiedosis und unabhängig vom Teilchentyp