

# Festkörperelektronik

## Vorlesung 8

Prof. Nils Weimann

IW / Bauelemente der Höchstfrequenzelektronik (BHE)

03.07.2025



Bitte in Moodle bis spätestens zum 4.7. an der  
Lehrevaluation teilnehmen!

## Hiwi-Stellen im Fachgebiet BHE

- ▶ TCAD Simulation (Halbleitergleichungen)
- ▶ optische Messungen
- ▶ Höchstfrequenz-Messungen

## Informationen zur Klausur FKE

- ▶ schriftliche Klausur (mit Anwesenheit in der UDE) am 30. Juli 2020, 08:30 Uhr, Räume werden noch angekündigt
- ▶ Format ~ Übungsaufgaben
- ▶ Probe-Klausur wird angeboten → Übungsleiter

## Zusammenfassung letzte Vorlesung

- ▶ Ladungstransport im Festkörper
  - ▶ elektrischer Strom
  - ▶ Ladungsträgerkonzentration
  - ▶ Geschwindigkeit der Ladungsträger
  - ▶ Beweglichkeit
  - ▶ äußere Felder (**E** und **H**)
  - ▶ Generation & Rekombination
  - ▶ Halbleitergleichungen
- ▶ Wechselwirkung mit Licht
  - ▶ Absorption
  - ▶ Emission

## Ziele der heutigen Vorlesung

- ▶ Wechselwirkung mit Licht
  - ▶ Photoleitung
  - ▶ Halbleiterlaser
- ▶ Halbleiteroberfläche
  - ▶ Bändermodell
  - ▶ Debye-Länge
  - ▶ Oberflächenleitfähigkeit
- ▶ Halbleiter-Festkörper-Grenzflächen
  - ▶ Metall-Isolator-Halbleiter-System (MOS)

## Wechselwirkung mit Licht

## Wechselwirkung mit Licht

- ▶ Photonen sind Elementarteilchen der elektromagnetischen (EM) Strahlung
- ▶ Licht ist ein Ausschnitt des EM-Spektrums, Radiowellen → Röntgenstrahlung
- ▶ Photonenenergie  $W_{ph}$  proportional der Frequenz  $f$

$$W = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

- ▶ Photonenimpuls  $p_{ph}$  proportional zur Wellenzahl  $k$

$$|\vec{p}_{ph}| = |\hbar \cdot \vec{k}| = \frac{h}{\lambda} = \frac{hf}{c}$$

- ▶ Photonen wechselwirken mit dem Halbleiter → Optoelektronik
  - ▶ Absorption
  - ▶ Emission

## Absorption von Licht im Halbleiter

- ▶ Licht breitet sich im Vakuum ungeschwächt aus
- ▶ in Materie tritt Absorption auf
- ▶ auch im Halbleiter durch Energieübertrag auf das Elektronensystem  
→ Auslöschung des Photons
- ▶ Absorption  $\sim$  Intensität

$$dI = -\alpha \cdot I(x) dx$$

- ▶ Integration liefert Lambert-Beer'sches Gesetz

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x)$$

- ▶ Intensität fällt nach Wegstrecke  $1/\alpha$  um Faktor  $1/e$  ab

## Absorption von Licht im Halbleiter

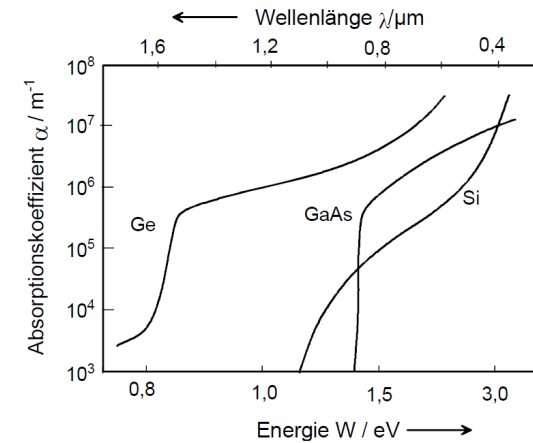
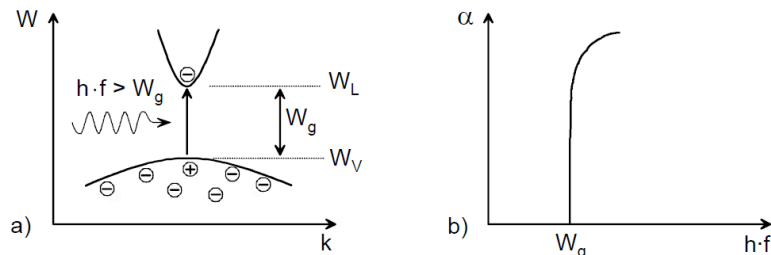


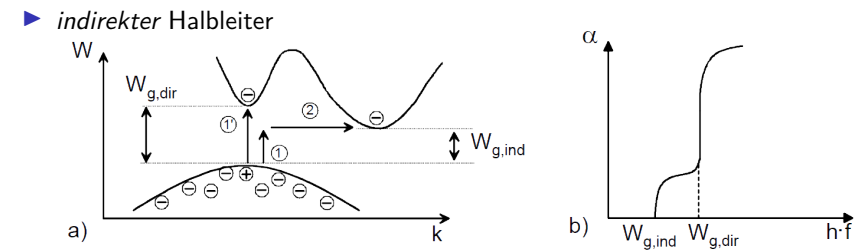
Abbildung: Absorption über Wellenlänge: grundsätzlicher Unterschied zwischen GaAs und (Si oder Ge): eine bzw. zwei Schultern

## Absorption: Einfluss der Bandstruktur

- ▶ im intrinsischen Halbleiter
  - ▶ fast alle Elektronen im Valenzband
  - ▶ zur Absorption muss  $W_{ph} = h \cdot f \geq W_g$  erfüllt sein
- ▶ Bandverlauf im  $E(k)$ -Raum (a) und Absorption (b) für direkten Halbleiter (z.B. GaAs)



## Absorption: Einfluss der Bandstruktur

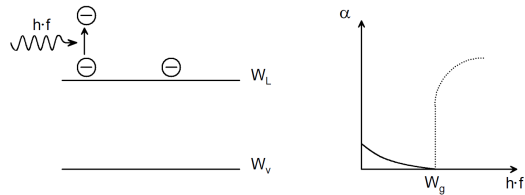


- ▶ indirekter Halbleiter

- ▶ effizienter direkter Übergang für  $W_{phot} > W_{g,dir}$  (Impulserhaltung,  $p_{phot} \sim 0$ )
- ▶ indirekter Übergang schon bei  $W_{phot} > W_{g,indir}$  unter Beteiligung von Phononen ( $p_{phon}$  groß,  $W_{phon} \sim 0$ )
- ▶ indirekter Übergang benötigt Elektron, Photon und Phonon  
→ Prozess höherer Ordnung mit kleinerer Wahrscheinlichkeit  
→ geringere Absorption

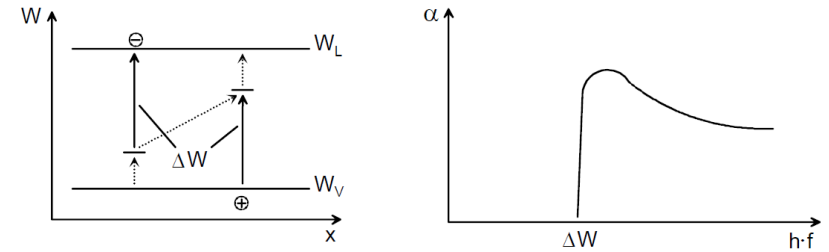
## Absorption durch freie Ladungsträger

- ▶ delokalisiertes Elektron im Leitungsband kann Energie von Photon aufnehmen



- ▶ Elektron wird im Leitungsband auf höheres Niveau angeregt
- ▶ Verlauf  $\alpha(h \cdot f)$  bestimmt durch Impulserhaltung
- ▶ schrittweise Relaxation zum Ausgangszustand über mehrfache Phononen-Emission (Licht  $\rightarrow$  Wärme)

## Absorption durch Störstellen



- ▶ tiefe Störstellen erlauben Absorption unter der Bandlücke  
(links) Übergang von besetztem tiefen Akzeptoren ins Leitungsband  
(rechts) Übergang von Valenzband zu ionisiertem tiefen Donator
- ▶ auch Übergänge zwischen Störstelle und benachbarter Bandkante möglich (im Infraroten)

## Photoleitung

- ▶ freie Ladungsträger werden durch Absorption generiert  $\rightarrow$  zusätzliche Leitfähigkeit  $\kappa_{ph}$

$$\kappa_{ph} = q [\Delta n \cdot \mu_n + \Delta p \cdot \mu_p]$$

- ▶ Abweichung der Ladungsträgerkonzentration vom Gleichgewicht  $n_0$ ,  $p_0$

$$\Delta n = n_1 - n_0$$

$$\Delta p = p_1 - p_0$$

- ▶ die Konzentrationsabweichungen  $\Delta n$ ,  $\Delta p$  sind i.A. zeitabhängig und verschwinden bei Ausschalten der Beleuchtung
- ▶ Beweglichkeiten  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  sind konstant

## Photoleitung

- ▶ Berechnung für  $n$ -Halbleiter
- ▶ Kontinuitätsgleichung für Elektronen (deren Überschusskonzentration)

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \vec{J}_n + g_n - r_n$$

- ▶ gleichmäßige Beleuchtung einer Fläche von oben  $\rightarrow$  ortsunabhängiger Strom

$$\nabla \vec{J}_n = 0$$

- ▶ einfallende Photonen  $L$  pro Volumen und Zeiteinheit  $[L] = \text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$  erzeugen je ein Elektron-Loch-Paar

$$g_n = L = g_p$$

## Photoleitung

- ▶ **Fall a) reine Elektron-Loch-Rekombination, intrinsischer Halbleiter**

$$\Delta n \approx \Delta p$$

- ▶ Reaktionsgleichung  $n + p \rightarrow 0$ , Massenwirkungsgesetz mit Konstante  $r_n/B$

$$\Delta n(t) \cdot \Delta p(t) = \frac{r_n}{B}$$

- ▶ d.h. Rekombinationsrate  $r_n$  ist proportional zu  $\Delta n(t) \cdot \Delta p(t)$  weil Elektron und Loch benötigt werden

## Photoleitung

- ▶  $r_n$  eingesetzt in die Kont.gl.

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = L - B \cdot \Delta n(t) \cdot \Delta p(t)$$

- ▶ Fall a1) stationäre Beleuchtung

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = 0$$

- ▶ daraus folgt

$$\Delta n = \sqrt{\frac{L}{B}}$$

- ▶ und für starke Beleuchtung  $n_1 \gg n_0$  folgt die Ladungsträgerkonzentration  $n_1$

$$n_1 = \sqrt{\frac{L}{B}}$$

## Photoleitung

- ▶ Fall a2) Einschaltvorgang bei  $t = 0$
- ▶ am Anfang wenige Ladungsträger, d.h.  $\Delta n(t \sim 0) \approx 0$
- ▶ es folgt aus der Kont. gl.

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = L - B \cdot \Delta n(t) \cdot \Delta p(t) \approx L$$

- ▶ Integration gibt linearen Verlauf

$$\Delta n(t) = L \cdot t \quad \text{für } t \sim 0$$

- ▶ mit zunehmender Zeit  $t$  wird  $r_n \gtrsim 0$ , und  $n$  nähert sich langsamer dem stationären Wert  $n_1 = \sqrt{L/B}$

## Photoleitung

- ▶ Fall a3) Ausschaltvorgang bei  $t = t_1$ , dann ist  $L = g_n = 0$ ,  $\Delta n = \Delta n_1$  und die Kont.gl. liefert (mit  $\Delta p = \Delta n$ )

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = -B \cdot (\Delta n)^2$$

- ▶ Trennung der Variablen und Integration

$$\int_{\Delta n_1}^{\Delta n(t)} \frac{d(\Delta n)}{(\Delta n)^2} = -B \int_{t_1}^t dt$$

- ▶ Abklingen des Überschusses mit  $1/t$  für  $t \gg t_1$

## Photoleitung

- Beschreibung des Abklingens des Überschusses für  $t \gg t_1$

$$\Delta n = \frac{\Delta n_1}{1 + \Delta n_1 B(t - t_1)} \approx \frac{\Delta n_1}{B \cdot t}$$

- nach der Halbwertszeit  $\tau$  ist  $\Delta n(\tau) = 1/2$

$$\tau = \frac{1}{B \cdot \Delta n_1}$$

- bei starker Beleuchtung  $\Delta n_1 \approx n_1$

$$\tau = \frac{1}{B \cdot \Delta n_1} \approx (L \cdot B)^{-1/2}$$

- die Zeitkonstante  $\tau$  hängt also von der Beleuchtungsstärke  $L$  ab

## Photoleitung

- **Fall b) Rekombination über Störstellen**

- Rekombination braucht hier keine  $e$ - $h$ -Paare, sondern nur Elektronenüberschuss

$$r_n = C \cdot \Delta n$$

- daraus folgt Zeitkonstante  $\tau_n = 1/C$

$$r_n = \frac{\Delta n}{\tau}$$

- in die Kont.gl.

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = L - \frac{\Delta n}{\tau_n}$$

## Photoleitung

- Fall b1) stationäre Beleuchtung,  $\partial \Delta n / \partial t = 0$

$$\Delta n = L \cdot \tau_n$$

- bei starker Beleuchtung  $n_1 \gg n_0$  zählt das Verhältnis von Beleuchtungsstärke  $L$  und Zeitkonstante  $\tau_n$

$$n_1 = L \cdot \tau_n$$

- Fall b2) Einschaltvorgang bei  $t = 0$ , entspricht (a2)

$$\Delta n(t) = L \cdot t$$

- Fall b3) Ausschaltvorgang bei  $t = t_1$ , exponentieller Verlauf

$$\Delta n(t) \Delta n_1 \cdot e^{-\frac{t-t_1}{\tau_n}}$$

## Photoleitung

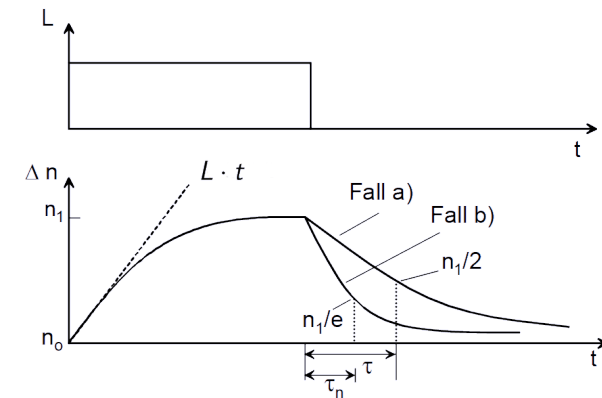


Abbildung: zeitlicher Verlauf der Überschusskonzentration. a) intrinsischer HL, b) Störstellenrekombination

## Emission von Licht

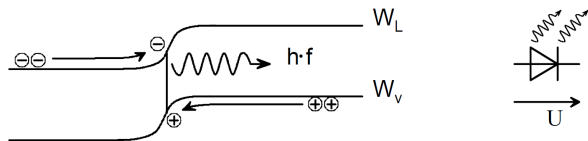
- ▶ umgekehrter Prozess der Absorption
- ▶ beim elektronischen Übergang gewonnene Energie wird als Photon abgegeben (strahlender Übergang)
- ▶ auch möglich: nichtstrahlender Übergang, Phononen, Energieübertrag an Gitterschwingungen
- ▶ für effiziente Emittoren, z.B. LED, muss nichtstrahlende Rekombination unterdrückt werden
- ▶ spontane Emission – zufälliger Prozess, Lumineszenz
- ▶ stimulierte Emission – resonanter Prozess, Laser

## spontane Emission – Lumineszenz

- ▶ unkorrelierte Prozesse, mittlere Lebensdauer  $\tau_{sp}$  des angeregten Zustands
- ▶ Anregung über
  1. Lichteinstrahlung höherer Energie – Photo-Lumineszenz
  2. Elektronenbeschuss – Kathodo-Lumineszenz
  3. Ladungsträgerinjektion – Elektro-Lumineszenz
  4. Erwärmung – Thermo-Lumineszenz
  5. chemische Reaktionen – Chemo-Lumineszenz
  6. mechanische Verspannung – Tribo-Lumineszenz
- ▶ Verfahren 1 und 2 zur Analyse von Halbleitern
- ▶ Verfahren 3 zur Lichterzeugung mittels  $pn$ -Übergang in LED oder Halbleiterlaser

## spontane Emission – LED

- ▶ light emitting diode



- ▶ Injektion von Löchern auf  $p$ -Seite und von Elektronen auf  $n$ -Seite einer  $pn$ -Diode
- ▶ Rekombination in der Raumladungszone
- ▶ benötigt direkten Halbleiter: III/V – GaN, GaAs
- ▶ Silizium leuchtet nicht!

## stimulierte Emission – LASER

- ▶ **light amplification by stimulated emission of radiation**
- ▶ stationäres Gleichgewicht  $\rightarrow$  Emission = Absorption z.B. in einem Gas oder Festkörper in Wechselwirkung mit dem EM-Strahlungsfeld
- ▶ einfaches System mit 2 Niveaus  $W_2 > W_1$  oder  $W_L > W_V$
- ▶ Resonanz bei  $hf = W_2 - W_1$  bietet sehr effizienten Übertrag wg. Energieerhaltung  $\rightarrow$  überwiegt alle anderen Prozesse
- ▶ betrachte 3 fundamentale Vorgänge:
  - a) spontane Emission
  - b) stimulierte Emission
  - c) Absorption

## Vorgänge im Laser

### a) spontane Emission im 2-Niveau-System

- ▶ beschrieben mit Übergangswahrscheinlichkeit
- ▶ nur abhängig von  $T$  und  $E(k)$ , nicht von der Intensität

$$P_{sp} = P_{21}^A = \frac{1}{\tau_{sp}}$$

### b) stimulierte Emission

- ▶ abhängig von der Feldintensität  $u(hf)$

$$P_{st} = u(hf) \cdot P_{21}^B = \frac{1}{\tau_{st}}$$

### c) (stimulierte) Absorption

- ▶ abhängig von der Feldintensität  $u(hf)$

$$P_{st} = u(hf) \cdot P_{12}^B$$

## Vorgänge im Laser

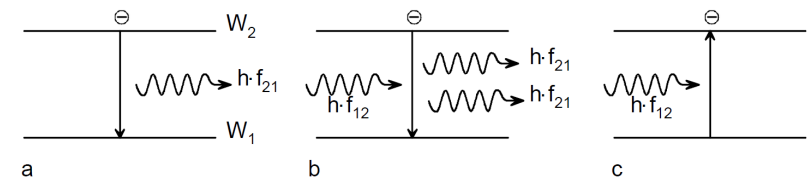


Abbildung: a) spontane Emission, b) stimulierte Emission, c) stimulierte Absorption

## Vorgänge im Laser

- ▶ relative Besetzung der Niveaus mit Boltzmann  $\sim \exp(W/kT)$
- ▶ stationäres Gleichgewicht, Emissionsrate = Absorptionsrate

$$e^{-W_2/kT} \cdot [P_{21}^A + u(hf) \cdot P_{21}^B] = e^{-W_1/kT} \cdot u(hf) \cdot P_{12}^B$$

- ▶ aus Planck'schem Strahlungsgesetz folgt  $P_{21}^B = P_{12}^B$  (s. Kap. 2.1)
- ▶ je stärker  $u(hf)$ , umso mehr überwiegt die stimulierte Emission → Lichtverstärkung
- ▶ Lichterzeugung, wenn Besetzungsinversion eingestellt wird → Pumpen

## Halbleiterlaser

- ▶  $pn$ -Diode wie bei LED, Betrieb vorwärts, direkter Bandübergang
- ▶ steigende Injektion mit höherem Strom, dadurch steigende spontane Emission
- ▶ hohe Injektion erreichbar mit hohen Dotierungen  $W_{Fn} > W_L$  und  $W_{Fp} < W_V$  (Entartung)
- ▶ daraus folgt **Laserbedingung 1**

$$W_{Fn} - W_{Fp} > W_g$$

- ▶ dies beschreibt die Besetzungsinversion

## Halbleiterlaser

$$e^{-W_2/kT} \cdot [P_{21}^A + u(hf) \cdot P_{21}^B] = e^{-W_1/kT} \cdot u(hf) \cdot P_{12}^B$$

- ▶ hohe Feldintensität erforderlich für überwiegende stimulierte Emission
- ▶ optischer Resonator (Spiegel) zur Aufrechterhaltung hoher Feldstärke
- ▶ nur ein Bruchteil der Strahlung wird (kontinuierlich) ausgekoppelt
- ▶ in einem Umlauf muss der Gewinn des Felds durch stimulierte Emission alle Verluste einschl. Auskopplung überwiegen

## Halbleiterlaser

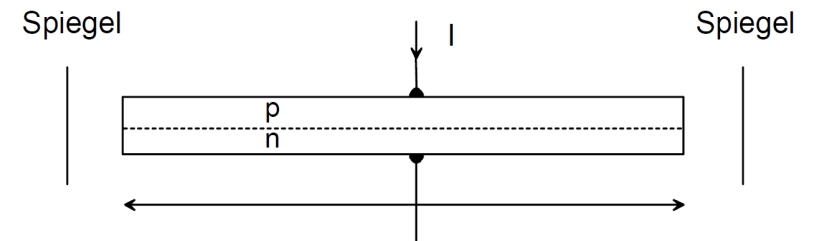


Abbildung: prinzipieller Aufbau eines Halbleiterlasers

## Halbleiterlaser

- ▶ Berechnung der Lichtintensität im Resonator der Länge  $\ell$
- ▶ zwei Spiegel mit Reflexionsfaktor  $R < 1$
- ▶ Lambert-Beer mit Absorptionsk.  $\alpha$  (Verluste)
- ▶ Gewinn  $g$  im Resonator (stim. Emission)

$$R^2 \exp(-2\alpha\ell + 2g\ell) \geq 1$$

- ▶ Wurzel ziehen

$$R \exp(-\alpha\ell + g\ell) \geq 1$$

- ▶ der Gewinn  $g$  muss mindestens sein

$$g \geq \frac{1}{\ell} \cdot \ln \frac{1}{R} + \alpha$$

- ▶ das ist die **Laserbedingung 2**

## Halbleiterlaser

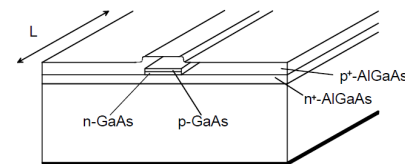


Abbildung: Streifenlaser mit vergrabener Doppel-Hetero-Struktur zur Konzentration der Ladungsträger und der optischen Mode

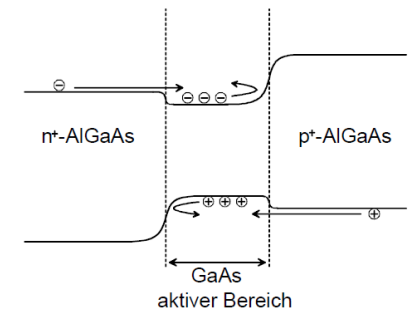
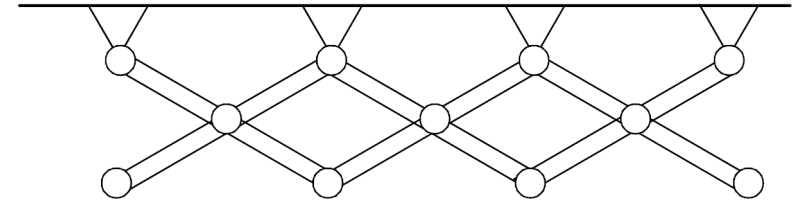


Abbildung: Bandstruktur einer Doppel-Hetero-Laserstruktur

## Halbleiteroberfläche

## Halbleiteroberfläche

- ▶ an der Oberfläche endet der Kristall
- ▶ die oberste Atomlage ist nur in 3 Richtungen koordiniert
- ▶ hier sind offene Bindungen

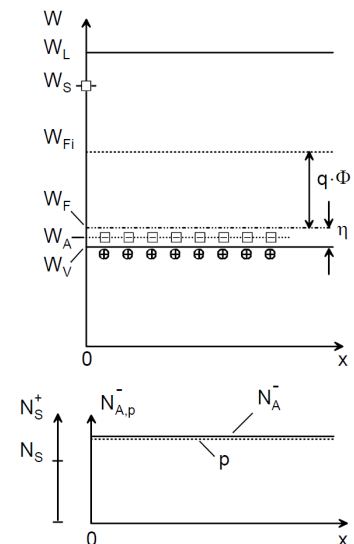


- ▶ zusätzliche Zustände, ähnlich Akzeptoren im  $p$ -HL
- ▶ **Oberflächenzustände**

## Halbleiteroberfläche

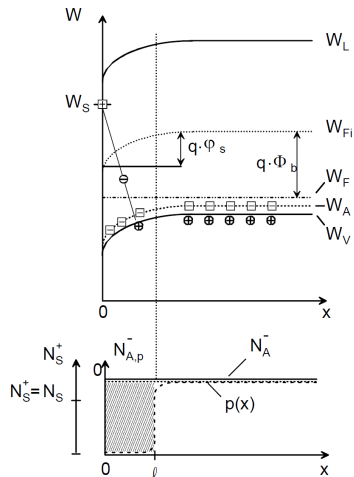
- ▶ „dangling bonds“ sind nicht stabil
- ▶ Oberflächenrekonstruktion
  - ▶ Umorientierung der freien Bindungen in Richtung Kristall
  - ▶ Entstehung von Paarbindungen zum seitlich nächsten Nachbarn
  - ▶ zusätzliche Kräfte in der obersten Schicht durch OF-Bindungen
  - ▶ Umorientierung der OF-Atome, Reduzierung der OF-Energie
- ▶ Chemische Reaktionen
  - ▶ Fremdatome können „dangling bonds“ absättigen
  - ▶ je nach Chemie Absättigung oder Erzeugung von Donator- oder Akzeptorzuständen
  - ▶ Oxidation, technisch genutzt in CMOS
  - ▶ Passivierung notwendig zur Kontrolle der Oberfläche im Bauelement

## Bändermodell: $p$ -Halbleiteroberfläche



- ▶ donatorartiger OF-Zustand, Energie  $W_S$
- ▶ Neutralität des Kristalls vorausgesetzt
- ▶ Zustände oberhalb der Fermienergie  $W_F$  unbesetzt
- ▶ OF-Zustand verliert Elektron, *rekombiniert* mit Loch im VB

## Bändermodell: *p*-Halbleiteroberfläche



- ▶ pro OF-Donator verschwindet ein Loch
- ▶ zurück bleiben negativ geladene Akzeptorrümpfe
- ▶ führt zu negativer Raumladungszone
- ▶ Verarmung von Löchern an der Oberfläche
- ▶ elektrisches Feld der Raumladung → Potential
- ▶ Verbiegung der Bänder an der OF

## Bändermodell: *p*-Halbleiteroberfläche

- ▶ Ladungsdichte  $Q_S$  der Oberfläche durch vollständig ionisierte OF-Zustände mit Dichte  $N_S$ ,  $[N_S] = \text{cm}^{-3}$
- ▶ Ladungsneutralität  $Q_S = q \cdot N_A^- \cdot \ell$  zwischen rekombinierten OF-Zuständen und Löchern
- ▶ Dicke  $\ell$  der Raumladungszone folgt aus  $N_S = N_A^- \cdot \ell$
- ▶ Poisson-Gleichung für Ladungsdichte  $\rho$

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_0\epsilon_r}$$

- ▶ abrupte Grenze der Raumladungszone

$$\rho = \begin{cases} q [p(x) - N_A^-] & \text{für } 0 \leq x \leq \ell \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

## Bändermodell: *p*-Halbleiteroberfläche

- ▶ eindimensionale Betrachtung senkrecht zur OF

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{qN_A^-}{\epsilon_0\epsilon_r}$$

- ▶ Randbedingungen

$$\begin{aligned} \varphi &= 0 \\ \frac{d\varphi}{dx} &= 0 \quad \text{für } x = \ell \end{aligned}$$

- ▶ Lösungen

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dx} &= -\frac{qN_A^-}{\epsilon_0\epsilon_r} (\ell - x) = -E(x) \\ \varphi(x) &= +\frac{qN_A^-}{2\epsilon_0\epsilon_r} (\ell - x)^2 \end{aligned}$$

## Bändermodell: *p*-Halbleiteroberfläche

- ▶ für  $x = 0$  das Oberflächenpotential (Bandverbiegung)  $\varphi_S$

$$\varphi(x=0) = \varphi_S = \frac{qN_A^- \ell^2}{2\epsilon_0\epsilon_r}$$

- ▶ Verschiebung der Bandkanten an der Oberfläche

$$\Delta W = \Delta W_L = \Delta W_V = \Delta W_A = \Delta W_{Fi} = -q\varphi_S = \frac{q^2 N_A^- \ell^2}{2\epsilon_0\epsilon_r}$$

- ▶ mit Ladungsneutralität  $N_S^+ = N_A^- \cdot \ell$

$$\varphi_S = \frac{q (N_S^+)^2}{2\epsilon_0\epsilon_r}$$

- ▶ Beispiel:  $\epsilon_r = 12$ ,  $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_S = 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

$$\ell = 0,1 \mu\text{m} \text{ und } \varphi_S = 0,4 \text{ eV; vgl. } W_g = 1,5 \text{ eV}$$

## Bändermodell: *p*-Halbleiteroberfläche

- ▶ Ladungsträgerkonzentration unter der Oberfläche?
- ▶ allgemein gilt mit  $\eta_p(x) = W_F - W_V(x)$

$$p = N_V \cdot e^{-\frac{W_F - W_V}{kT}} = N_V \cdot e^{-\frac{\eta_p(x)}{kT}}$$

- ▶ Zusammenhang mit elektrischem Potential  
 $\eta_p(x) = \eta_p(x \rightarrow \infty) + q\varphi(x)$  gibt Löcherkonzentration  $p(x)$   
 verglichen mit Gleichgewichtskonzentration  $p_0$  im Volumen

$$p(x) = p_0 \cdot e^{-\frac{q\varphi(x)}{kT}}$$

- ▶ → Berechnung von Dioden, Transistoren, ...

## Debye-Länge

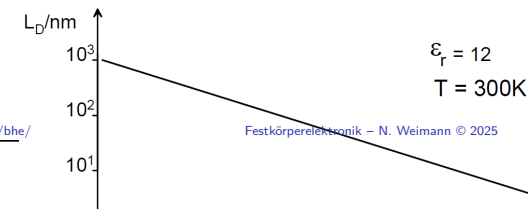
- ▶ aus Bandverbiegung  $\varphi_S$  folgt Verarmungstiefe  $\ell$  = Ausdehnung der Raumladungszone

$$\ell = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r\varphi_S}{qN_A^-}}$$

- ▶ Normierung von  $\varphi_S$  auf Temperaturspannung  
 $U_{th} = kT/q$  (= 26 mV at 300 K)

$$\begin{aligned}\ell &= \sqrt{\frac{\epsilon_0\epsilon_r}{qN_A^-} \cdot \frac{kT}{q}} \cdot \sqrt{2\frac{q\varphi_S}{kT}} \\ &= L_{Dp} \cdot \sqrt{2\frac{q\varphi_S}{kT}}\end{aligned}$$

- ▶ Debye-Länge  $L_{Dp}$  beschreibt den Abfall der Inhomogenität von Ladungsträgern, und zwar der Majoritätsladungsträger (hier Löcher im *p*-dotierten Halbleiter)



## Debye-Länge

- ▶ Debye-Länge  $L_{Dp}$  beschreibt den Abfall der Inhomogenität von Ladungsträgern, und zwar der **Majoritätsladungsträger** (hier: Löcher im *p*-dotierten Halbleiter)

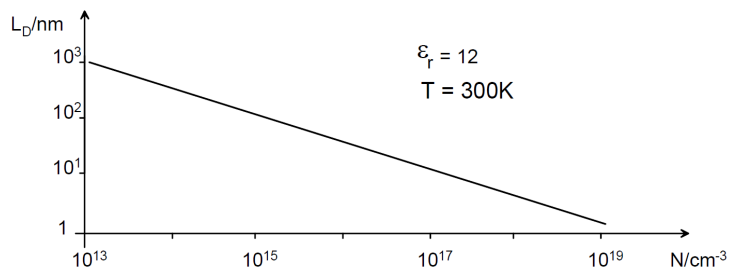
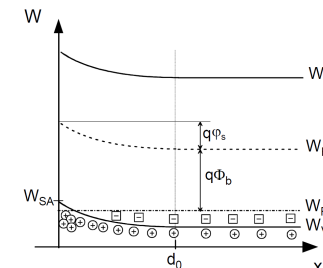


Abbildung: Debyelänge über Dotierkonzentration

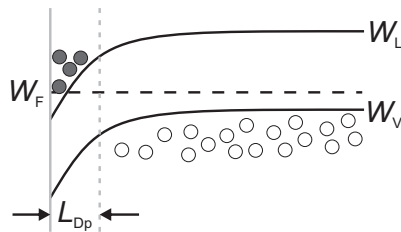
## Oberflächen-Leitfähigkeit

- ▶ Bandverbiegung entsprechend dem Typ des Oberflächen-Zustands
- ▶ für *p*-Halbleiter
  - ▶ Donator-ähnliche Zustände → Verarmung der Löcher an der Oberfläche
  - ▶ Akzeptor-ähnliche Zustände → *Anreicherung*



## Oberflächen-Leitfähigkeit

- ▶ bei extremer Bandverbiegung taucht im p-Halbleiter das *Leitungsband* durch das Fermi-Niveau
- ▶ Anreicherung von Elektronen an der Oberfläche

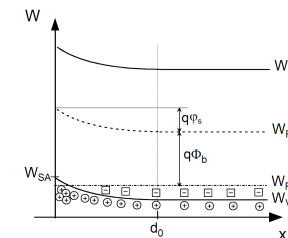


- ▶ **Inversion** des Leitungstyps

## Oberflächen-Leitfähigkeit

**Tabelle:** Zusammenhänge für *p*- und *n*-Halbleiter mit dotierabhängigem  $\phi_b = W_{Fi} - W_F$  und OF-Potential  $\varphi_S$

|              | <i>p</i> -Halbleiter     | <i>n</i> -Halbleiter     |
|--------------|--------------------------|--------------------------|
| Anreicherung | $\varphi_S < 0$          | $\varphi_S > 0$          |
| Verarmung    | $0 < \varphi_S < \phi_b$ | $\phi_b < \varphi_S < 0$ |
| Inversion    | $0 < \phi_b < \varphi_S$ | $\varphi_S < \phi_b < 0$ |

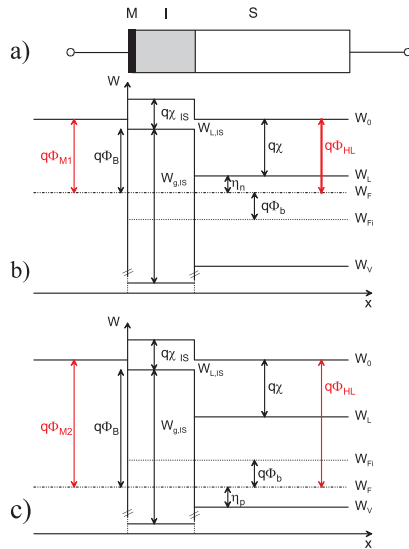


## Grenzflächen zwischen Halbleiter und Festkörper

## Grenzflächen zwischen Halbleiter und anderem Festkörpertyp

- ▶ bis jetzt behandelt
  - ▶ Volumen-Halbleiter (unendlich ausgedehnt)
  - ▶ lokale Dotierung und lokales Feld im Halbleiter als Abweichung vom Gleichgewicht
  - ▶ Grenzfläche zum Vakuum
- ▶ Grenzflächen bringen *Funktion* ins Bauelement
  - ▶ Metall-Halbleiter → Kontakt, Ohm und Schottky
  - ▶ Isolator-Halbleiter → Feldeffekt-Bauelemente, CMOS
  - ▶ Heterostruktur → Optoelektronik, spezielle Elektronik
- ▶ große technische Bedeutung der Grenzflächen
  - ▶ Reinheit und Reproduzierbarkeit
  - ▶ Zuverlässigkeit
  - ▶ Performanz des Bauelements

## Metall-Isolator-Halbleiter (MOS)



- Bändermodell MOS (auch MIS genannt, der Isolator muss kein Oxid sein)
  - a) physikalische Struktur
  - b)  $n$ -Halbleiter
  - c)  $p$ -Halbleiter
- Fermi-Niveau  $W_F$  durchgängig → Gleichgewicht
- Austrittsarbeiten des Metalls  $q\Phi_M$  und des Halbleiters  $q\Phi_{HL}$  → Position der Bänder

## MOS mit Bias: Anreicherung

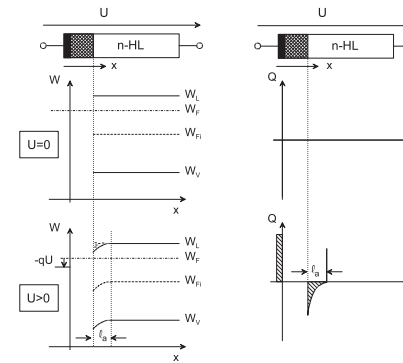
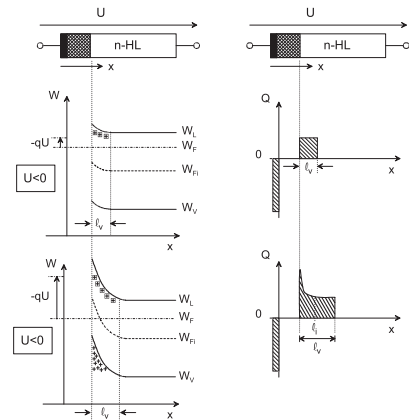


Abbildung: Bändermodell einer idealen MIS-Struktur a)  $U = 0$ , b)  $U > 0$

- $U > 0$  erniedrigt  $W_{Fi}$
- Anreicherung von Elektronen an Metall-Isolator Grenzfläche
- Metall wird positiv aufgeladen
- extreme Elektronendichte im Metall verteilt diese Ladung
- im Metall keine lokalisierte Raumladung (kleine Debye-Länge)

## MOS mit Bias: Verarmung und Inversion



- $U < 0$  erhöht  $W_{Fi}$
- Verarmung von Elektronen an Metall-Isolator Grenzfläche
- für  $U \ll 0$  und  $W_{Fi} > W_F$  tritt Inversion ein

$$p(x=0) = N_V \cdot e^{-\frac{W_F - W_V}{kT}}$$

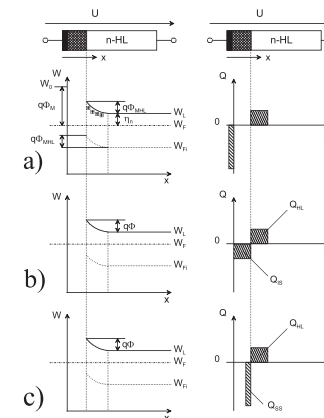
$$> N_L \cdot e^{-\frac{W_L - W_F}{kT}}$$

$$= n(x=0)$$

Abbildung: ideale MIS-Struktur

- a)  $U < 0$  (Verarmung),
- b)  $U < 0$  (Inversion)

## nichtideale MOS-Struktur



- unterschiedliche Austrittsarbeiten  $\Phi$
- Ladungen  $Q_{IS}$  im Isolator
- Grenzflächenladungen  $Q_{SS}$
- Anreicherung, Verarmung, Inversion hängen von allen Faktoren ab

Abbildung: a)  $\Phi_M \neq \Phi_{HL}$ ,  
b) neg.  $Q_{IS}$ , c) neg.  $Q_{SS}$

## nichtideale MOS-Struktur

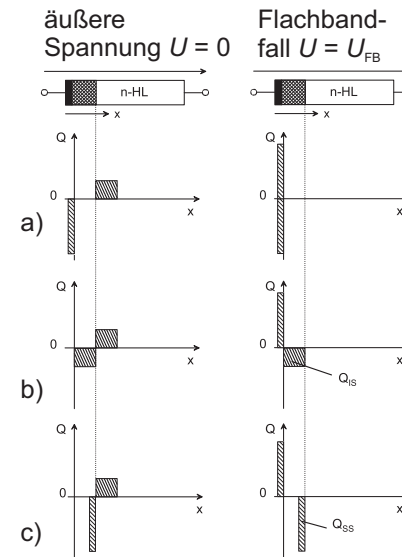
Differenz der Austrittsarbeiten

$$\begin{aligned} q(\Phi_M - \Phi_{HL}) &= q\Phi_M - (q\chi + \eta_n) \\ &= q\Phi_M - \left( q\chi + \frac{W_g}{2} - q\psi_b \right) \end{aligned}$$

Zusammenfassung der möglichen Fälle (ohne  $Q_{IS}$  und  $Q_{SS}$ )

|                      |                               |              |
|----------------------|-------------------------------|--------------|
| $\Phi_M < \Phi_{HL}$ |                               | Anreicherung |
| $\Phi_M > \Phi_{HL}$ | $\Phi_M - \Phi_{HL} < \psi_b$ | Verarmung    |
|                      | $\Phi_M - \Phi_{HL} > \psi_b$ | Inversion    |

## nichtideale MOS-Struktur



### ► Ladungsverteilung

- a)  $\Phi_M \neq \Phi_{HL}$
- b) negative Oxidladung  $Q_{IS} < 0$
- c) negative Grenzflächenladung  $Q_{SS} < 0$

## Flachbandfall

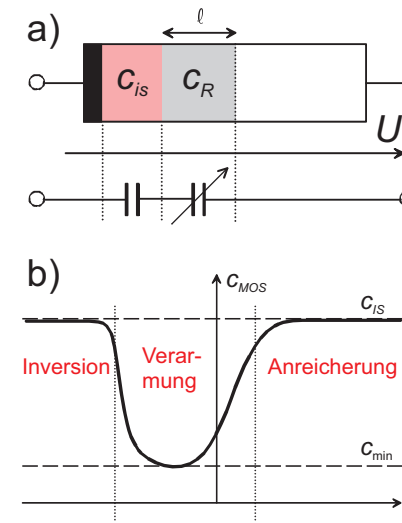
- Flachbandfall  $U = U_{FB}$  = keine Bandverbiegung
- Spannung  $U_{FB}$  wird angelegt, um idealen Bandverlauf (ohne unterschiedliche Austrittsarbeiten und feste Ladungen) zu erhalten

$$U_{FB} = \Phi_M - \Phi_{HL} - \frac{Q_{IS}}{c_{IS}} - \frac{Q_{SS}}{c_{IS}}$$

- unterschiedliche Austrittsarbeiten  $\Phi_M, \Phi_{HL}$
- lokalisierte Oxidladungen  $Q_{IS}$
- lokalisierte Grenzflächenladungen  $Q_{SS}$
- mit Oxid-Kapazität pro Fläche

$$c_{IS} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r,IS}}{d}$$

## CV-Kennlinie der MOS-Diode



- feste Oxidkapazität  $c_{is}$
- Serienschaltung mit Verarmungskapazität  $c_R$

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_{IS}} + \frac{1}{c_R}$$

- maximaler Wert von  $c_R$

$$c_{R,max} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r,HL}}{\ell}$$

- minimale MOS-Kapazität

$$\frac{1}{c_{min}} = \frac{1}{c_{IS}} + \frac{1}{c_{R,max}}$$

## CV-Kennlinie der MOS-Diode

- ▶ feste Oxidkapazität  $c_{is} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r IS}{d}$
- ▶ variable Kapazität  $c_R$  der Raumladungszone aus Ladungsbilanz
- ▶ gesamte Ladung der Raumladungszone

$$Q_R = q \cdot N_D^+ \cdot \ell \quad \text{in Einheiten} \quad [Q_R] = C/cm^2$$

- ▶ Kapazität pro Flächeneinheit

$$c_R = \frac{dQ_R}{dU_R} = q \cdot N_D^+ \frac{d\ell}{dU_R}$$

- ▶ mit über der RLZ abfallenden Spannung

$$U_R = \varphi_s$$

## CV-Kennlinie der MOS-Diode

- ▶ Länge der RLZ bereits berechnet (OF-Verarmung)

$$\ell(\varphi_s) = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r HL}{q N_D^+}} \cdot \varphi_s$$

- ▶ daraus folgt

$$\begin{aligned} c_R &= q \cdot N_D^+ \cdot \frac{d\ell}{d\varphi_s} = q \cdot N_D^+ \cdot \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r HL}{q N_D^+}} \cdot \frac{d\sqrt{\varphi_s}}{d\varphi_s} \\ &= \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r HL \cdot q N_D^+}{2 \cdot \varphi_s}} \end{aligned}$$

## CV-Kennlinie der MOS-Diode

- ▶ OF-Potential  $\varphi_s$  entspricht Flachbandspannung  $U_{FB}$

$$\varphi_s = U_{FB} - U \quad \text{mit} \quad U < U_{FB}$$

- ▶ eingesetzt in den Kapazitätsbelag  $c_R$

$$c_R = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r HL q N_D^+}{2(U_{FB} - U)}} \quad \text{für} \quad U < U_{FB}$$

- ▶ mit der Debye-Länge  $L_{Dn} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r HL}{q N_D^+}} \cdot \frac{kT}{q}$

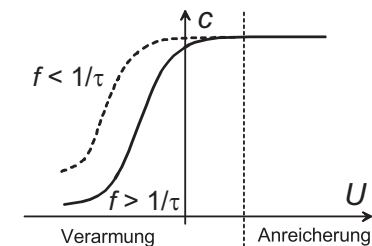
$$c_R = \frac{L_{Dn} q N_D^+}{\sqrt{2 \frac{kT}{q} (U_{FB} - U)}} \quad \text{für} \quad U < U_{FB}$$

- ▶ gesamte Kapazität als Serienschaltung

$$\frac{1}{c_{MOS}} = \frac{1}{c_{IS}} + \frac{1}{c_R(U)} \quad \text{d.h.} \quad c_{MOS} \leq c_{IS}$$

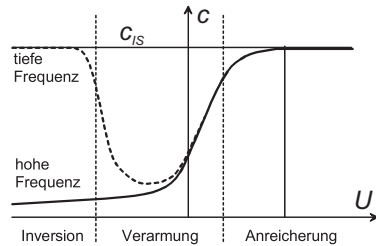
## CV-Kennlinie der MOS-Diode

- ▶ Ladung im Oxid  $Q_{IS}$  und in der Grenzfläche  $Q_{SS}$  ist spannungsabhängig und kann von zeitlich veränderlicher Spannung  $U(t)$  umgeladen werden
- ▶ für die Umladung ist eine Zeit  $\tau_s$  nötig
- ▶ für Frequenzen  $f > 1/\tau_s$  wird nur ein Teil der Zustände ge- und entladen
- ▶ daher ist  $c_{MOS}$  kleiner bei hohen Frequenzen



## CV-Kennlinie der MOS-Diode

- ▶ im Inversionsbereich besteht starke Abhängigkeit von der Frequenz
- ▶ Inversion bedeutet Bereitstellung von Minoritäten an der Oxid-Halbleiter-Grenzfläche
- ▶ dies erfordert Elektron-Loch-Paarerzeugung durch thermische Generation, unwahrscheinlich bei RT
- ▶ langsamer Prozess,  $\tau_{inv} = 10^{-6}$  s bis 1 s



## Zusammenfassung der Vorlesung

- ▶ Wechselwirkung mit Licht
  - ▶ Photoleitung
  - ▶ Halbleiterlaser
- ▶ Halbleiteroberfläche
  - ▶ Bändermodell
  - ▶ Debye-Länge
  - ▶ Oberflächenleitfähigkeit
- ▶ Halbleiter-Festkörper-Grenzflächen
  - ▶ Metall-Isolator-Halbleiter-System (MOS)

Danke für Ihre Teilnahme!