

Name:

3.März 2006

Legi Nr.:

Vorlesung gehört im SS 2005: ja  nein

## Wiederholungs-Prüfungsklausur

Vorlesung Halbleiterbauelemente 35-056, Dozent: Prof. A. Schenk

**Maximale Punktzahl: 63**

**Achtung:** Ihr Name muss auf **jedem** Lösungsblatt erscheinen!

Schreiben Sie neben numerischen Resultaten stets die Herleitungen und verwendete Formeln auf Ihr Lösungsblatt!

**Es müssen nicht alle Aufgaben gelöst werden für die Höchstnote. Verweilen Sie also nicht zu lange bei einer Aufgabe, die Ihnen Schwierigkeiten bereitet!**

### Zahlenwerte verwendeter Naturkonstanten: Materialparameter

|              |  |
|--------------|--|
| $h$          | Planck'sches Wirkungsquantum = $6.625 \cdot 10^{-34} Js$         |
| $c$          | Lichtgeschwindigkeit im Vakuum = $3 \cdot 10^8 m/s$              |
| $q$          | Elementarladung = $1.602 \times 10^{-19} C$                      |
| $k_B$        | Boltzmann-Konstante = $8.62 \cdot 10^{-5} eV/K$                  |
| $k_B T/q$    | Thermospannung = $0.0259V$ bei 300 K                             |
| $m_e$        | Ruhemasse des Elektrons = $9.11 \times 10^{-31} kg$              |
| $\epsilon_0$ | absolute Dielektrizitätskonstante = $8.854 \times 10^{-14} F/cm$ |

### Zahlenwerte verwendeter Materialparameter für Silizium:

|                 |   |
|-----------------|---|
| $N_c^{Si}$      | effektive Zustandsdichte im Leitungsband (Si,300K) = $2.8 \times 10^{19} cm^{-3}$ |
| $N_v^{Si}$      | effektive Zustandsdichte im Valenzband (Si,300K) = $1.04 \times 10^{19} cm^{-3}$  |
| $\epsilon_{Si}$ | relative Dielektrizitätskonstante von Si = 11.9                                   |
| $E_g^{Si}$      | Bandlücke des Silizium bei 300 K = 1.12 eV  |
| $\epsilon_{ox}$ | relative Dielektrizitätskonstante von $SiO_2$ = 3.9                               |
| $\chi$          | Elektronenaffinität von Silizium = 4.15 V   |
| $\chi'$         | Modifizierte Elektronenaffinität von Silizium = 3.25 V                            |

*Wenn nicht anders erwähnt, gehen Sie von einer Temperatur von 300 Kelvin aus.*

# Grundlagen der Halbleiterphysik

(1) Allgemeine Fragen zu Ladungsträgern in Halbleitern:

- a) **(2 Punkte)** Was repräsentiert die effektive Masse  $m_{\text{eff}}$ ? Wie ist sie mit dem Bandverlauf verknüpft?
- b) **(2 Punkte)** Warum ist Gallium Arsenid für optoelektronische Bauteile geeigneter als Silizium?
- c) **(2 Punkte)** Ein Festkörper befindet sich im thermodynamischen Gleichgewicht. Was bedeutet dies hinsichtlich des Ferminiveaus?
- d) **(2 Punkte)** Was ist die Ursache der Driftströme?
- e) **(2 Punkte)** Nennen Sie zwei Methoden, wie im Halbleiter das Ferminiveau geändert werden kann.

## Einfache Halbleiterbauelemente

(2) Sie müssen als Ingenieur einen integrierten Widerstand für Hochtemperaturanwendungen auf Siliziumbasis konzipieren. Um das Bauelement zu steuern, darf der Widerstand erst weit oberhalb von 500 K intrinsisch werden, d.h. bei 500 K soll die intrinsische Elektronendichte noch nicht mehr als 10 % der gesamten Elektronenkonzentration betragen. Die Länge ist aufgrund der Technologie auf  $1.3 \mu\text{m}$  festgelegt.  $n_i(300\text{K}) = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .

- a) **(3 Punkte)** Wie stark müssen Sie dotieren?
- b) **(3 Punkte)** Berechnen Sie die Position des Ferminiveaus ihres gemäss a) dotierten Widerstands im Bezug auf die Mitte der Bandlücke  $E_{\text{midgap}}$  bei 300 K und bei 500 K.
- c) **(3 Punkte)** Der el. Widerstand Ihres Bauteils soll bei Hochtemperatur  $100 \text{ k}\Omega$  betragen. Beweglichkeiten der Ladungsträger bei 500 K:  $\mu_n = 570 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\mu_p = 170 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Wie gross müssen Sie die Querschnittsfläche wählen?

(3) Eine Siliziumdiode mit der Querschnittsfläche  $A = 10^{-4} \text{ cm}^2$  habe bei Raumtemperatur ( $T = 300 \text{ K}$ ) die Parameter gemäss Tabelle rechts.

|             | <i>p</i> -Gebiet                     | <i>n</i> -Gebiet                     |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| $N_a$       | $= 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ | $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$      |
| $\tau_{n0}$ | $= 10^{-6} \text{ s}$                | $\tau_{p0} = 10^{-7} \text{ s}$      |
| $\mu_n$     | $= 1250 \text{ cm}^2/\text{Vs}$      | $\mu_n = 850 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ |
| $\mu_p$     | $= 420 \text{ cm}^2/\text{Vs}$       | $\mu_p = 320 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ |

- a) **(2 Punkte)** Berechnen Sie die Diffusionsspannung  $V_{\text{bi}}$ .
- b) **(3 Punkte)** Es liege nun eine Vorwärtsspannung  $V_a = 0.5 \text{ V}$  an. Wie gross ist die Ausdehnung der Raumladungszone auf der *p*- bzw. *n*-Seite? Wie hoch ist die maximale elektrische Feldstärke?
- c) **(2 Punkte)** Wie gross ist die Kapazität der Verarmungsschicht?
- d) **(4 Punkte)** Bestimmen Sie die Diffusionsströme der Minoritätsladungsträger an den Rändern der Raumladungszone. Wie gross ist der Gesamtstrom, der durch die Diode fliesst?
- e) **(3 Punkte)** Berechnen Sie den Sättigungsstrom in Sperrichtung und ermitteln Sie die Änderung des Gesamtstromes bei einer Erhöhung der Temperatur um 10 K. Vernachlässigen Sie dabei die Temperaturabhängigkeit der Bandlücke  $E_g$ .

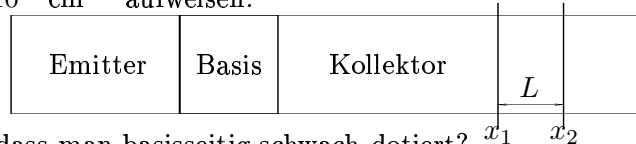
# Transistoren

- (4) Auf einem Siliziumwafer sollen MOS Transistoren angefertigt werden. Die Hintergrunddotierung des Wafers betrage  $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Mittels Ionen-Implantation werden Source- und Draingebiete hergestellt. In diesen soll das Fermi-niveau  $0.11 \text{ eV}$  unterhalb der Leitungsbandkante liegen bei  $300 \text{ K}$ .  $n_i(300 \text{ K}) = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .

- (1 Punkt)** Handelt es sich bei der Source um ein  $n$ - oder  $p$ -Gebiet?
- (1 Punkt)** Geben Sie ein Element an, mit dem die Hintergrunddotierung gefertigt sein könnte.
- (2 Punkte)** Womit müssen Sie folglich implantieren? Schlagen sie 2 mögliche Dotier-Elemente vor.
- (2 Punkte)** Wie stark müssen sie die implantierten Gebiete dotieren, um die geforderte Bedingung zu erfüllen?
- (2 Punkte)** Wie gross wird das eingebaute Potential zwischen Drain und Substrat ihres MOSFETs?

- (5) Der Kollektor eines NPN-Bipolartransistors soll basisseitig eine Dotierung von  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  und kontaktseitig eine Dotierung von  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  aufweisen.

Die Dotierungen soll daher in einem Bereich  $[x_1 \ x_2]$  der Länge  $L = 15 \mu\text{m}$  linear ansteigen.



- (2 Punkte)** Was ist der Grund, dass man basisseitig schwach dotiert?
- (2 Punkte)** Warum wählt man kontaktseitig eine hohe Dotierung?
- (3 Punkte)** Berechnen Sie das induzierte elektrische Feld an beiden Enden  $x_1$  und  $x_2$  des Übergangsbereichs unter der Annahme von Quasineutralität, d.h.  $N_d(x) \approx n_0(x)$ . Ist diese Annahme gerechtfertigt?
- (3 Punkte)** Der BJT befinde sich im thermodynamischen Gleichgewicht. Bewirkt dieses Dotierprofil eine Bandverbiegung im Kollektor? Falls ja, wie gross wird sie? Falls nein, warum nicht?

- (6) Um die Exaktheit eines  $n$ -MOSFET Herstellungsverfahrens auf Siliziumbasis zu überprüfen, vermessen Sie die Kennlinien eines einzelnen Transistors. Das Oxid besteht aus nahezu perfektem  $\text{SiO}_2$  der Dicke  $90 \text{ nm}$ , Grenzflächenladungen können vernachlässigt werden. Die Breite des Kanals ist bekannt und gleich  $0.8 \mu\text{m}$ . Die Mobilität der Kanalelektronen kann in guter Schätzung als  $\mu_n = 600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  angenommen werden.

- Die Gatespannung setzen Sie zuerst auf  $V_{GS} = 4 \text{ V}$  und fahren die Drainspannung hoch. Bei  $V_{DS} = 3.1 \text{ V}$  sättigt die Kennlinie und es fliesst ein Drainstrom von  $0.82 \text{ mA}$ .
- Nun belassen Sie  $V_{DS} = 3.1 \text{ V}$  und drehen die Gatespannung hinauf. Bei  $V_{GS} = 4.4 \text{ V}$  messen Sie  $I_D = 1.22 \text{ mA}$ .

- (2 Punkte)** Wie gross ist die Schwellspannung ihres Transistors?
- (2 Punkte)** Handelt es sich um einen Enhancement oder Depletion mode MOSFET? (Begründung)
- (3 Punkte)** Wie gross muss aufgrund ihrer Messungen die Kanallänge sein?
- (2 Punkte)** Befindet sich der MOSFET bei der Messung Nr. 2 in Sättigung? (Begründung)
- (3 Punkte)** Bestimmen Sie den Gegenwert (Transconductance) des Bauteils für  $V_{DS} = 3.1 \text{ V}$  im Nichtsättigungs- und im Sättigungsbereich.