

Name:

21. September 2006

Legi Nr.:

Vorlesung gehört im SS 2006: ja  nein

## Prüfungsklausur

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

Maximale Punktzahl: 66

**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 = $6.625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
$c$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum = $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
$q$	Elementarladung = $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
$k_B$	Boltzmann-Konstante = $8.62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K} = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
$k_B T/q$	Thermospannung = $0.0259 \text{ V}$ bei $300 \text{ K}$
$m_e$	Ruhemasse des Elektrons = $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
$\epsilon_0$	absolute Dielektrizitätskonstante = $8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$

### Zahlenwerte verwendeter Materialparameter für Silizium:

$N_c^{Si}$	effektive Zustandsdichte im Leitungsband (Si, 300K) = $2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
$N_v^{Si}$	effektive Zustandsdichte im Valenzband (Si, 300K) = $1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
$\epsilon_{Si}$	relative Dielektrizitätskonstante von Si = 11.9
$E_g^{Si}$	Bandlücke des Silizium bei $300 \text{ K}$ = 1.12 eV
$\epsilon_{ox}$	relative Dielektrizitätskonstante von $\text{SiO}_2$ = 3.9
$\chi$	Elektronenaffinität von Silizium = 4.05 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 zur Halbleiterphysik:

- a) **(2 Punkte)** Silizium weist am  $\Gamma$ -Punkt zwei verschiedene Valenzbänder unterschiedlicher Krümmung auf. Welche Folge hat das im Bezug auf Ladungsträger in Si?
- b) **(2 Punkte)** Was ist ein ternärer Halbleiter? Nennen Sie ein Beispiel.
- c) **(2 Punkte)** Wie ist zu erklären, dass Silizium in GaAs als Elektronen-Donator wirkt?
- d) **(2 Punkte)** Für ein Halbleitermaterial sei die Bandkrümmung beim Valenzband-Maximum viel grösser als die Bandkrümmung beim Leitungsband-Minimum. Liegt das intrinsische Fermi-niveau dann oberhalb der Bandlücken-Mitte? (Begründung)
- e) **(2 Punkte)** Gegeben sei ein dotierter Halbleiter. Was kann man über die Lage des Fermi-niveaus mit zunehmender Temperatur aussagen?

## Einfache Halbleiterbauelemente

### (2) Fragen zur Diode

- a) **(3 Punkte)** Wie erreichen Sie für eine PN-Diode bei gegebenem Halbleitermaterial (z.B. Silizium) einen möglichst grossen Gleichrichter-Effekt?
  - b) **(3 Punkte)** Weshalb weicht für sehr kleine Vorwärtsspannungen der real gemessene Strom einer Diode vom einfachen idealen Gesetz  $J = J_s[\exp(V_a/V_t) - 1]$  ab? Ist der real gemessene Strom grösser oder kleiner als der ideale?
  - c) **(3 Punkte)** Wie lässt sich erklären, dass die Sperrstromdichte einer Schottky-Diode von der Stärke der Sperrspannung abhängt?
- (3) Sie untersuchen das I-V-Verhalten einer Nickel-Silizium Schottky-Diode bei  $T = 300$  K und messen bei einer Vorwärtsspannung von  $V_a = 0.4$  Volt eine Stromdichte  $J = 1$  A/cm<sup>2</sup>. Aus Datenblättern wissen Sie, dass die Austrittsarbeit von Nickel (Ni) 5.15 eV beträgt.
- a) **(2 Punkte)** Wie gross ist die ideale Schottky-Barriere der Diode?
  - b) **(2 Punkte)** Wie gross ist gemäss Ihrer Messung die Sperrstromdichte des Bauteils?
  - c) **(3 Punkte)** Bestimmen Sie die effektive Richardson-Konstante *aufgrund Ihrer Messung* unter der Annahme, dass die ideale Schottky-Barriere zwischen Metall und Halbleiter besteht.
  - d) **(3 Punkte)** Berechnen Sie nun die effektive Richardson-Konstante aufgrund der theoretischen Formel. Die Masse  $m_n^*$  für Leitungsband-Elektronen in Silizium ist  $1.08m_0$ .
  - e) **(3 Punkte)** Wie gross ist folglich in Ihrem Bauteil die Absenkung  $\Delta\phi$  gegenüber der idealen Barriere?

## Transistoren

- (4) Wir untersuchen das Verhalten eines Silizium-NPN-Bipolartransistors bei kleinen Kollektorströmen, d.h. wir beschalten den BJT im aktiven Verstärkungsmodus bei kleiner Basis-Emitter-Spannung von  $V_{BE} = +0.3$ V. Rechnen Sie mit  $n_i(Si) = 10^{10}$  cm<sup>-3</sup>.

Das Bauteil weist folgende Kenngrössen auf:  $N_E = 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>,  $N_B = 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>; die mittlere Lebensdauer von Elektronen und Löchern in Emitter und Basis sei  $\tau_0 = 10^{-6}$  s.

- a) **(3 Punkte)** Wie erklärt es sich, dass die Common-Emitter-Verstärkung  $\beta$  für solche kleine  $V_{BE}$  abnimmt und geringer ist als das ideale  $\beta$ ?
- b) **(4 Punkte)** Berechnen Sie den Vorfaktor  $J_{r0}$  und damit den Rekombinationsstrom  $J_R$  über die Basis-Emitter-Diode bei der gegebenen Vorspannung.
- c) **(3 Punkte)** Es sei der Sättigungsstrom  $J_{s0}$  über die Basis-Emitter-Diode bekannt und  $J_{s0} = 10^{-11} \text{ A/cm}^2$ . Wie gross wird folglich der Rekombinationsfaktor  $\delta$  des Bauteils?
- d) **(3 Punkte)** Wir nehmen nun  $J_{r0}$  und  $J_{s0}$  als konstant an, d.h. unabhängig von  $V_{BE}$ . Ab welcher Vorwärtsspannung  $V_{BE}$  wird der Rekombinationsfaktor des BJT grösser als  $\delta = 0.9977$ ?
- (5) Sie müssen als Designer einer Halbleiterfirma die NMOS-Technologie anpassen. Die Schwellspannung soll neu  $V_T = +0.6 \text{ V}$  betragen. Das Gate der Transistoren besteht aus N<sup>+</sup>-Polysilizium, das Substrat aus p-Typ Silizium mit einer Hintergrunddotierung von  $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Aus alten Messungen wissen Sie, dass bei diesem Prozess mit einer Flächenladungsdichte von  $Q'_{ss}$  von  $10^{11} \text{ cm}^{-2}$  gerechnet werden muss. Es ist  $n_i(Si) = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .
- a) **(3 Punkte)** Wie gross ist der Unterschied der Fermienergien  $\phi_{ms}$  in der MOS-Diode?
- b) **(3 Punkte)** Bestimmen Sie die maximale Ausdehnung der Raumladungszone Ihres MOSFETS bei Anliegen der Schwellspannung.
- c) **(3 Punkte)** Berechnen Sie nun, wie dick Sie das Gate-Oxid wählen müssen, um die geforderte Schwellspannung zu erreichen!
- d) **(2 Punkte)** Ist Ihr Transistor mit diesen Parametern ein Enhancement- oder Depletion-Mode Bauteil? (Begründung).

## Optische Bauelemente

- (6) Sie haben den Auftrag, das Herzstück einer Lichtschranke zu konzipieren, nämlich einen Silizium-Chip mit integriertem Photoleiter. Sie können davon ausgehen, dass das auftretende Laserlicht eine Generationsrate von  $G_L = 10^{21} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$  im Halbleiter hervorruft. Die Versorgungsspannung des Photoleiter-Chips ist  $V = 7 \text{ Volt}$ .

Sie entnehmen der Literatur, dass bei der gegebenen Dotierung die Lebensdauer der Ladungsträger  $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$  ist. Ausserdem betragen die Mobilitäten von Elektronen und Löchern  $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  und  $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ .

- a) **(2 Punkte)** Der Sensor soll hochfrequente optische Signale auflösen können. Wie lang darf ihr Photoleiter maximal sein, damit die Transitzeit für Elektronen nur  $t_n = 4 \cdot 10^{-9} \text{ s}$  beträgt?
- b) **(3 Punkte)** Wie gross wird nun der Verstärkungsfaktor Ihres optischen Bauteils?
- c) **(3 Punkte)** Um einen Unterbruch der Laserbescheinung zuverlässig detektieren zu können, muss der Unterschied zwischen dunklem und hellem Strom im Photoleiter mindestens  $1 \text{ mA}$  betragen. Wie gross müssen Sie folglich die Querschnittsfläche des Bauteils wählen?
- d) **(2 Punkte)** Länge und Querschnittsfläche des Photoleiters sind nun also fixiert aufgrund der Spezifikationen. Was müsste man am Chip folglich ändern, um die optische Verstärkung zu verdoppeln bei gleichbleibender Geometrie (und gleichbleibenden Lebensdauern der Ladungsträger)?