

# Klausur Elektronik I

Wintersemester 2005/2006



Name: .....

Vorname: .....

Matrikelnummer:.....

**Wichtige Hinweise zur Bearbeitung:**

Die Bearbeitungszeit der Aufgaben betrat 120 Minuten. Es sind alle Hilfsmittel erlaubt, mit Ausnahme elektronischer Geräte, die zur Kommunikation verwendet werden können. Dazu gehören zum Beispiel: Laptops, PDAs, Handys, etc.

Versehen Sie bitte ALLE von Ihnen verwendeten zusätzlichen Lösungsblätter mit Ihrem Namen, Ihrer Matrikelnummer und der Nummer der darauf bearbeiteten Aufgabe.

Die maximale Punktzahl der Klausur beträgt 147 Punkte. Etwa die Hälfte dieser Punktzahl ist zum Bestehen erforderlich.

Beachten Sie bitte die an jeder Aufgabe in [ ]-Klammern angegebene Punktzahl. Sie ist ein Anhaltspunkt für die Schwierigkeit und den erforderlichen Arbeitsaufwand.

Bei Multiple-Choice Aufgaben: Setzen Sie ein Kreuz in das jeweilige Kästchen dessen Aussage zutrifft. Möchten Sie Ihre Angaben korrigieren, so streichen Sie die GESAMTE Kastchenzeile der Aufgabe deutlich erkennbar durch und ersetzen Sie sie durch eine neue Kastchenzeile mit den richtigen Kreuzen. Falsche oder missverständlich gesetzte Kreuze ergeben Punktabzug.

Heften Sie bitte ALLE Aufgaben- und Lösungsblätter die Sie abgeben zusammen.

Ergebnis:

1) [1]	2) [1]	3) [3]	4) [4]	5) [4]	6) [3]	7) [3]	8) [4]	9) [4]	10) [3]	11) [6]	12) [3]		
13) [8]	14) [8]	15) [3]	16) [3]	17) [2]	18) [4]	19) [3]	20) [9]	21) [4]	22) [4]	23) [3]	24) [4]		
25) [4]	26) [2]	27) [4]	28) [5]	29) [5]	30) [5]	31) [6]	32) [5]	33) [5]	34) [5]	35) [4]	36) [3]		
										$\Sigma$ [147]	Note		

**Festkörperphysik**

- 1) [1] Die Masse eines Festkörpers wird im wesentlichen durch die darin enthaltenen Elektronen bestimmt,   
 trifft nicht zu. ....
- 2) [1] Je kleiner die Masse eines Teilches, umso größer ist seine de Broglie Wellenlänge,   
 trifft nicht zu. ....
- 3) [3] Wenn die Geschwindigkeit eines Elektrons gegen die Phasengeschwindigkeit seiner de Broglie Welle geht, dann geht die relativistische Masse des Elektrons   
 1. gegen seine Ruhemasse, .....   
 2. gegen unendlich, .....   
 3. weder 1. noch 2. trifft zu. ....
- 4) [4] Eine ebene Welle  $\psi(\vec{r}, t) = a e^{j(\omega t + \vec{k} \vec{r})}$  mit  $k_x = 1 m^{-1}$ ,  $k_y = -1 m^{-1}$  und  $k_z = 0$  hat Phasenflächen, die   
 1. parallel zur x-y-Ebene sind, .....   
 2. senkrecht zur x-y-Ebene sind, .....   
 3. in positiver x-Richtung über der Zeit fortschreiten,   
 4. in positiver y-Richtung über der Zeit fortschreiten,   
 5. nichts trifft zu. ....

**Festkörperphysik**

5) a) [1] Wieviele Elektronen befinden sich in dem 3p-Orbital eines einzelnen Si-Atoms? (Tragen Sie den Zahlenwert in das Kästchen ein.)

b) [1] Wieviele Elektronen kann das 3p-Orbital von Si insgesamt aufnehmen, bis es voll besetzt ist? (Tragen Sie den Zahlenwert in das Kästchen ein.)

c) [1] Wieviele nächste Nachbaratome hat ein Si-Atom in einem Si-Kristall? (Tragen Sie den Zahlenwert in das Kästchen ein.)

d) [1] Was geschieht mit dem 3s-Orbital und den sich darin befindenden Elektronen, wenn Si-Atome einen Kristall bilden? (Kurzer Text mit Stichworten genügt.)

.....  
 .....  
 .....

6) [3] Was führt zur Aufspaltung der Energieterme der Elektronen, wenn die Atomabstände von unendlich immer weiter auf den Abstand im Festkörper verringert werden?

- 1. Die Hybridisierung der äußeren Orbitale. ....
- 2. Die örtliche Überlappung der Wellenfunktionen der Elektronen. ...
- 3. Das Pauli-Prinzip. ....
- 4. Nichts trifft zu. ....

**Festkörperphysik**

- 7) [3] Die Bandlücke zwischen Valenz-und Leitungsband eines Halbleiters
- 1. hängt von dem Abstand der Atome im Kristall ab, .....
  - 2. entsteht durch die Überlappung der Wellenfunktionen der Elektronen,
  - 3. läßt sich durch Reflektion der Wellenfunktion der freien Elektronen am Kristallgitter erklären,
  - 4. nichts trifft zu. ....

- 8) [4] Im Leitungsband von eigenleitendem Silizium befinden sich
- 1. Löcher bei Raumtemperatur. ....
  - 2. Löcher bei T=0 K. ....
  - 3. Elektronen bei Raumtemperatur. ....
  - 4. Elektronen bei T=0 K. ....
  - 5. Nichts trifft zu. ....

- 9) [4] Wieviele freie Elektronen befinden sich in einem Halbleiterquader der Kantenlänge  $L$ , wenn die Wahrscheinlichkeit ein freies Elektron in einem Volumenelement der Größe  $L^3 \cdot 10^{-9}$  anzutreffen, 10 % beträgt? (Tragen Sie den Zahlenwert in das Kästchen ein.)

**Festkörperphysik**

10) [3] Freie Elektronen besitzen

- 1. potentielle Energie, .....
- 2. kinetische Energie, .....
- 3. beides, .....
- 4. nichts trifft zu. ....

11) [6] Die Fermienergie eines freien Elektronengases in einem Quader der Kantenlänge  $L$  beträgt  $W_F = \frac{\hbar^2}{2m_e} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2$ . Wieviele Elektronen können in dem Elektronengas maximal enthalten sein? (Tragen Sie den Zahlenwert in das Kästchen ein.)

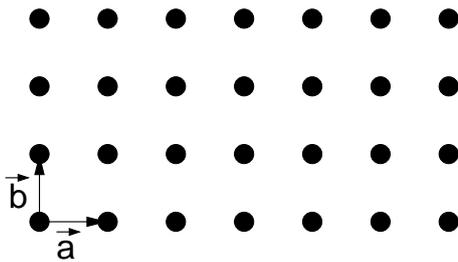
12) [3] Wieviele freie Elektronen entfallen anteilig auf das Volumen einer einfach kubischen Elementarzelle, wenn jedes Atom zwei freie Elektronen abgibt? (Tragen Sie den Zahlenwert in das Kästchen ein.)

13) [8] Gegeben ist ein kubisch-primitives Kristallgitter (Kristallachsen  $\vec{a} = a_0\vec{e}_x$ ,  $\vec{b} = a_0\vec{e}_y$ ,  $\vec{c} = a_0\vec{e}_z$ ). Geben Sie die Miller-Indizes von mindestens vier Kristallebenen an, in denen jeweils vier Atome einer Elementarzelle liegen.

.....  
 .....  
 .....

**Festkörperphysik**

- 14) [8] Ein zweidimensionaler Kristall hat die Achsen  $\vec{a} = a_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{b} = a_0 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  (kartesische Koordinaten), die das unten dargestellte Kristallgitter ergeben. Zeichnen Sie in das Gitter eine Ebenenschar ein, zu der der reziproke Gittervektor  $\vec{G} = \frac{2\pi}{a_0} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$  gehört.



- 15) [3] Wann erfüllt ein Wellenvektor die Bragg-Bedingung?
- 1. Wenn er in der ersten Brillouin Zone liegt. ....
  - 2. Wenn er auf dem Rand der zweiten Brillouin Zone liegt. ....
  - 3. Immer wenn er das  $\frac{1}{2}$ -fache eines reziproken Gittervektors ist ...   
 $(\vec{k} = \frac{1}{2}\vec{G})$ .
  - 4. Nichts trifft zu. ....

- 16) [3] Die Oberkante des Valenzbandes wird näherungsweise durch  $W = -\alpha k^2 + \beta$  beschrieben. Die effektive Masse eines Elektrons im Bereich dieser Näherung
- 1. wird größer mit größer werdendem  $\alpha$ , ....
  - 2. ist unabhängig vom Wellenvektor ( $k$ ), ....
  - 3. wird für  $\alpha = 0$  so groß, dass sich das Elektron nicht mehr bewegt,
  - 4. nichts trifft zu. ....

**Festkörperphysik**

17) [2] Wird derselbe Zustand wahlweise durch ein Elektron oder durch ein Loch besetzt, dann ist (beachten Sie die Vorzeichen!)

1. bei einem Zustand im Valenzband die Masse des Elektrons größer als die des Lochs,
2. bei einem Zustand im Leitungsband die Masse des Elektrons größer als die des Lochs,
3. nichts trifft zu. ....

18) [4] Wird in Berechnungen mit Löchern gearbeitet, führt das bei Halbleitern dazu, daß

1. für  $T=0$  K die Löcherdichte im Valenzband zu Null gesetzt werden kann,
2. bei Eigenleitung immer gleich viele Löcher wie Elektronen vorhanden sind,
3. gegenüber dem Fall dass mit der Gesamtzahl der zur Stromleitung beitragenden Elektronen gerechnet wird, sich der Strom *vergrößert*, da Elektronen und Löcher zum Stromfluss beitragen,
4. gegenüber dem Fall dass mit der Gesamtzahl der zum Stromleitung beitragenden Elektronen gerechnet wird, sich der Strom *verringert*, da Elektronen und Löcher in entgegengesetzte Richtungen fließen,
5. nichts trifft zu. ....

**Elektronen in Valenz- und Leitungsband**

19) [3] Wie groß ist die Besetzungswahrscheinlichkeit  $w$ , eines Donatorniveaus  $W_D$  der Dotierung  $N_D$  mit Elektronen? ( $f(W_D)$  ist der Wert der Fermi-Dirac Verteilungsfunktion bei der Energie  $W_D$ .)

1. Bei Störstellenerschöpfung ist  $w=1$ . .....
2.  $w = N_D f(W_D)$ . .....
3.  $w = N_D(1 - f(W_D - kT \ln 2))$ . .....
4. Nichts trifft zu. ....

**Elektronen in Valenz- und Leitungsband**

20) [9] Ein mit  $N_A = 10^{18} \text{cm}^{-3}$  dotierter Silizium-Halbleiter wird bei Störstellenerschöpfung außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts betrieben. Der örtliche Verlauf der Valenzband-Kante läßt sich durch  $W_V = W_0 + 0.01 x \frac{eV}{m}$  beschreiben. Die Ladungsträgerverteilung im Halbleiter ist homogen.

Es gilt:  $\mu_p = 400 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \approx \mu_n$ ,  $N_V = 1,8 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3} \approx N_C$ .

Verwenden Sie, wenn nötig für die Berechnung ein getrenntes Blatt und tragen Sie die Ergebnisse hier an die vorgesehenen Stellen ein.

1. Wie groß ist der Betrag  $E$  der Feldstärke im Halbleiter?

$E =$
-------

2. Welche Bedingung muss das Quasi-Ferminiveau der Elektronen erfüllen, damit der Beitrag der Elektronen zum Strom vernachlässigbar ist:

.....  
 .....  
 .....

3. Die Bedingung unter Aufgabenteil Zwei sei erfüllt. Wie groß ist der Betrag  $J$  der Stromdichte im Halbleiter, wenn die Fermienergie der Löcher im Bändermodell um  $kT$  über  $W_V$  liegt.

$J =$
-------

**p-n-Übergang**

21) [4] An einen Halbleiter wird über zwei Elektroden eine konstante Spannung angelegt. Es herrschen homogene Verhältnisse. Der Strom durch die Elektroden ist

- 1. umgekehrt proportional zur mittleren Stoßzeit (=mittlere Freiflugzeit) der Ladungsträger,
- 2. proportional zur Zeit, die ein beliebiger Ladungsträger für den Weg zwischen den beiden Elektroden benötigt,
- 3. proportional zur Spannung, solange die mittlere Stoßzeit näherungsweise proportional zur Feldstärke im Halbleiter ist,
- 4. proportional zur Spannung, solange die mittlere Stoßzeit näherungsweise proportional zur thermischen Geschwindigkeit ist,
- 5. nichts trifft zu. ....

22) [4] In welchen Fällen tritt in einem Halbleiter ein Diffusionsstrom auf?

- 1. Immer wenn Störstellenerschöpfung vorliegt. ....
- 2. Immer wenn Störstellenerschöpfung und eine inhomogene Dotierung vorliegt.
- 3. Immer wenn die Ladungsträgerdichten von den Gleichgewichtsdichten abweichen.
- 4. Voraussetzung für einen Diffusionsstrom ist  $T > 0K$ . ....
- 5. Nichts trifft zu. ....

**p-n-Übergang**

23) [3] In welchen Fällen ist die Netto-Rekombinationsrate in einem Halbleiter gleich Null?

- 1. Im stationären Fall (keine Zeitabhängigkeit). .....
- 2. Immer wenn pro Zeiteinheit genausoviele Elektronen vom Leitungs- in das Valenzband gelangen, wie Löcher in der umgekehrten Richtung.
- 3. Immer wenn die Quasi-Ferminiveaus von Elektronen und Löchern identisch sind.
- 4. Nichts trifft zu. ....

24) [4] Eine in ein Halbleitersubstrat ( $\epsilon_r = 12$ ) eingebrachte Raumladung ist nach  $0,1 \text{ ns}$  auf die Hälfte ihres Anfangswertes abgeklungen. Wie hoch ist die Leitfähigkeit  $\sigma$  des Halbleitersubstrates? (Die Lebensdauer der Ladungsträger liegt im  $ms$ -Bereich.)

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

$\sigma =$
------------

**p-n-Übergang**

25) [4] Wir betrachten einen n-dotierten Halbleiter. Begründen Sie bitte, warum

- 1. bei tiefen Temperaturen mehr Elektronen aus dem Donator-Niveau als aus dem Valenzband in das Leitungsband gelangen,
- 2. bei hohen Temperaturen mehr Elektronen aus dem Valenzband als aus dem Donator-Niveau in das Leitungsband gelangen.

1: .....

2: .....

26) [2] Wie groß ist bei Silizium die Besetzungswahrscheinlichkeit  $w$  der Oberkante des Valenzbandes durch ein Loch, wenn das Fermi-niveau genau auf der Oberkante liegt? Tragen Sie das Ergebnis in das Kästchen rechts ein.

$w =$
-------

**p-n-Übergang**

27) [4] Geben Sie für thermodynamisches Gleichgewicht die *Neutralitätsbedingung* des Halbleiters für den allgemeinen Fall an. Vereinfachen Sie sie für den Fall, dass Störstellenerschöpfung vorliegt und der Halbleiter stark n-dotiert ist ( $N_D \ll n_i$ ). Begründen Sie Ihre Vereinfachungen.

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

28) [5] Es wird eine Messreihe an mehreren p-n-Dioden mit abruptem Übergang durchgeführt. Gemessen wird die Sperrschichtkapazität  $C_J$  bei verschiedenen Dotierungen für die immer  $N_D \ll N_A$  gilt. Die Spannung über den Dioden ist gleich Null. Welche Proportionalität zwischen  $C_J$  und der Dotierung wird sich zeigen?

- 1.  $C_J \propto \sqrt{N_D}$  .....
- 2.  $C_J \propto \sqrt{N_A}$  .....
- 3.  $C_J \propto \sqrt{N_A N_D}$  .....
- 4.  $C_J \propto \sqrt{\frac{N_A}{\ln(N_A N_D)}}$  .....
- 5. Nichts trifft zu, richtig wäre  $C_J \propto$

**p-n-Übergang**

29) [5] Was trifft auf eine ideale lange p-n-Diode bei Flußpolung zu?

1. In der Raumladungszone überwiegt der Diffusionsstrom. ....
2. In der Raumladungszone gilt  $n \cdot p < n_i^2$ . ....
3. In der Raumlaungszone werden Elektronen und Löcher generiert.
4. In den Bahngebieten rekombinieren die Minoritätsträger vollständig.
5. Bei gleicher Flußspannung und Dotierung ist der Stom in einer langen Diode größer als bei einer Kurzen (Spannungsabfall über die Bahngebiete vernachlässigt).
6. Nichts trifft zu. ....

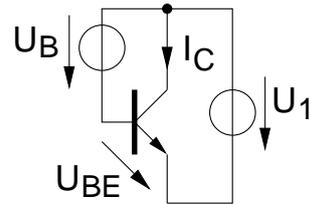
**Bipolar-Transistor**

30) [5] Ein homogen dotierter npn-Bipolar-Transistor mit abrupten Übergängen wird im *normal-aktiven* Betriebsbereich betrieben.  $p_{e0}$ ,  $n_{b0}$  und  $p_{c0}$  sind die Gleichgewichtsdichten im Emitter- Basis- und Kollektor-Bahngbiet.  $N_B$  ist die Basisdotierung. Es herrscht Störstellenerschöpfung und die Dotierungskonzentrationen sind viel größer als die Eigenleitungsdichte. Was trifft auf die ortsabhängigen Ladungsträgerdichten  $p_e(x)$ ,  $p_b(x)$ ,  $n_b(x)$ ,  $p_c(x)$  in den Bahngbietern von Emitter, Basis und Kollektor zu?

- 1.  $p_e(x) \geq p_{e0}$ . .....
- 2.  $p_b(x) \leq \frac{N_B}{n_i^2}$ . .....
- 3.  $n_b(\text{am Rand zum Emitter}) > n_{b0}$ . .....
- 4.  $n_b(\text{am Rand zum Kollektor}) > n_{b0}$ . .....
- 5.  $p_c(x) \geq p_{c0}$ . .....
- 6. Nichts trifft zu. ....

**Bipolar-Transistor**

31) [6] Ein Bipolar-Transistor wird in der rechts gezeigten Schaltung mit  $U_1 = 5V$  betrieben. Die Steuerkennlinie des Transistors ist durch  $I_C = I_S(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1)$  mit  $I_S = 10^{-15}A$  und  $U_T = 25mV$  beschrieben. Sie können wegen  $I_C \ll I_S$  geeignete Näherungen verwenden.



1. Geben Sie eine Formel für die Steilheit  $g_m = \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} \right|_{U_{CE}=0}$  des Transistors an.

$g_m =$
---------

2. Wie groß muß  $U_B$  gewählt werden damit  $g_m = \frac{1}{1\Omega}$  gilt? .....

$U_B =$
---------

3. Es gilt der Arbeitspunkt unter Punkt 2. Um welchen Betrag  $\Delta I_C$  wird sich  $I_C$  näherungsweise ändern, wenn sich  $U_B$  um 1mV ändert?

$\Delta I_C =$
----------------

32) [5] Der Early Effekt bei einem normal aktiv betriebenen Transistor

1. Wird ursächlich durch die Kollektor-Emitter-Spannung hervorgerufen,
2. wird ursächlich durch die Kollektor-Basis-Spannung hervorgerufen,
3. hängt maßgeblich von der Ausdehnung der Raumladungszone in den Kollektor ab,
4. bewirkt für  $U_{CB} > 0$  (vom Kollektor zur Basis gerichtet) eine Vergrößerung des Kollektorstroms gegenüber dem Fall  $U_{CB} = 0$ ,
5. bewirkt eine Verringerung des Ausgangsleitwertes  $h_{22}$ , .....,
6. nichts trifft zu. ....

### Unipolare Bauelemente

- 33) [5] Ein n-dotierter Si-Halbleiter wird mit einem Metall kontaktiert. Es sollen ideale Verhältnisse vorliegen. Die Austrittsarbeit des Metalls entspricht der Elektronenaffinität des Halbleiters. Die Differenz zwischen Austrittsarbeit des Halbleiters und der Austrittsarbeit des Metalls beträgt 0,3 eV.

Wie hoch ist die Dotierung des Halbleiters im Verhältnis zur effektiven Zustandsdichte des Leitungsbandes? Tragen Sie den Faktor in das Kästchen rechts ein.

- 34) [5] An einen Sperrschicht-Feldeffekttransistor mit einer Pinch-off Spannung von -2V wird eine Gate-Source Spannung von 0V angelegt.

Wie hoch muss die Drain-Gate-Spannung mindestens sein, damit der Transistor im Abschnürbereich arbeitet.

- 35) [4] Das Prinzip der Stromleitung in einem MOS-Feldeffekttransistor basiert auf

1. der Driftbewegung von Ladungsträgern, .....
2. der Influenz von Majoritätsträgern (d.h. Elektronen im n-Halbleiter oder Löcher im p-Halbleiter) unter dem Gate,
3. der Sperrpolung des Metall-Halbleiter-Übergangs unter dem Gate,
4. der Abschnürung des Kanals im aktiven Bereich, .....
5. nichts trifft zu. ....

### Unipolare Bauelemente

- 36) [3] Erläutern Sie für den MOS-FET mit wenigen Worten, warum
1. der Inversionskanal, an der Halbleiteroberfläche, direkt unter dem, Gate entsteht, obwohl die Ladungsträger, aus denen er sich zusammensetzt, auch aus tiefer liegenden Schichten stammen,
  2. der Strom bei Abschnürung in erster Näherung nicht weiter mit  $U_{DS}$  steigt und
  3. bei genauerer Betrachtung dennoch eine Erhöhung des Stroms mit steigendem  $U_{DS}$  im Abschnürbereich stattfindet. (Welcher Effekt?)

1: .....

2: .....

3: .....