

Institut für Hochfrequenz- und Halbleitersystemtechnologien

Klausur im Fach Halbleiterbauelemente

Wintersemester 2013 / 2014
31.03.2014



Sie haben sich zur Prüfung angemeldet. Die Klausuraufgaben entsprechen dem Inhalt von Vorlesung und Übung: WS 2013 / 2014 (2+2 SWS), insgesamt 4 SWS!

Name:	
Vorname:	
Matr. Nr:	
Studiengang:	

Aufgabe	1	2	3	4
Punkte	_____ / 9	_____ / 23	_____ / 26	_____ / 22

Gesamtpunktzahl	Note
_____ von 80 Punkten	_____

Überprüfen Sie die Vollständigkeit Ihrer Aufgabenblätter, die Klausur besteht aus insgesamt 18 einseitig bedruckten Seiten. Lesen Sie die Aufgaben immer vollständig durch! Sie finden bei jeder Aufgabe und auf diesem Deckblatt die maximal erreichbaren Punktzahlen.

Name: _____

Matr Nr: _____

Wichtige Anweisungen:

Bitte lesen Sie diese Anweisungen sorgfältig durch und befolgen Sie sie:

- Es sind außer Ihrem Schreibzeug, einfachem Zeichenmaterial, einem nicht programmierbaren Taschenrechner und den ausgegebenen Unterlagen keine weiteren Hilfsmittel zugelassen (insbesondere keine eigenen Unterlagen!).
- Beschriften Sie bitte alle Blätter mit Ihrem Namen und Ihrer Matrikelnummer!
- Lesen Sie bitte vor dem Beginn der Bearbeitung die einzelnen Aufgaben vollständig durch.
- Verwenden Sie den Platz unter den Aufgaben für Ihre Antworten. Sollte dieser Platz nicht ausreichen, benutzen Sie die Rückseite des Blattes. Darüber hinaus können Sie zusätzliche Lösungsblätter erhalten (auch für unwichtige Nebenrechnungen, Notizen).
- Sollten Sie die Rückseite oder ein zusätzliches Lösungsblatt benutzen, müssen Sie einen entsprechenden Hinweis unter die Aufgabe schreiben.
- Geben Sie das Deckblatt mit den Aufgaben- und allen Lösungsblättern (auch den unbenutzten) am Ende der Bearbeitung ab.

Betrugsversuche führen zum sofortigen Ausschluss von der Klausur!

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg bei der Bearbeitung!

Prof. C. Boit

C. Helfmeier

N. Herfurth

Name: _____

Matr Nr: _____

Für alle Aufgaben gilt, sofern nicht anders angegeben:

Siliziumhalbleiter bei $T = 300 \text{ K}$ mit $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

1. Multiple Choice Fragen

Bitte kreuzen Sie an, ob folgende Aussagen zutreffen! Setzen Sie pro Aussage maximal 1 Kreuz.

Je richtig gesetzter Ankreuzung erhalten Sie 1.5 Punkte. Falls Sie sich nicht sicher sind, können Sie die Frage mit „unsicher“ ankreuzen, in diesem Fall bekommen Sie dafür 0.5 Punkte. Für falsch gesetzte Ankreuzungen bekommen Sie keine Punkte. **Sollten Sie bei einer Frage mehr als ein Kreuz setzen, bekommen Sie keine Punkte.**

Zu den Inhalten der Multiple Choice Fragen werden während der Klausurbearbeitungszeit keine Fragen beantwortet.

Bitte kreuzen Sie an:

zutreffend	nicht zutreffend	unsicher
------------	---------------------	----------

a) Indirekte Halbleiter sind das ideale Material für die Herstellung von Leuchtdioden.

[] [] []

b) Das Fermienergielevel eines mit Phosphor dotierten Halbleiters ist höher als das intrinsische Fermienergielevel.

[] [] []

c) Ein Feldstrom entsteht nur bei inhomogenen elektrischen Feldern.

[] [] []

d) Generation in einem dotierten Halbleiter führt vor allem zur Erhöhung der Majoritätsladungsträger.

[] [] []

e) Der Gesamtstrom im Kanal eines MOSFETs ist unabhängig vom Ort entlang der Kanallänge.

[] [] []

f) Die Stromverstärkung eines Bipolartransistors in Basisschaltung ist von der Emitterweite und der Kollektordotierung abhängig.

[] [] []

Gesamt Teil 1: _____ / 9 Punkten erreicht

Name: _____

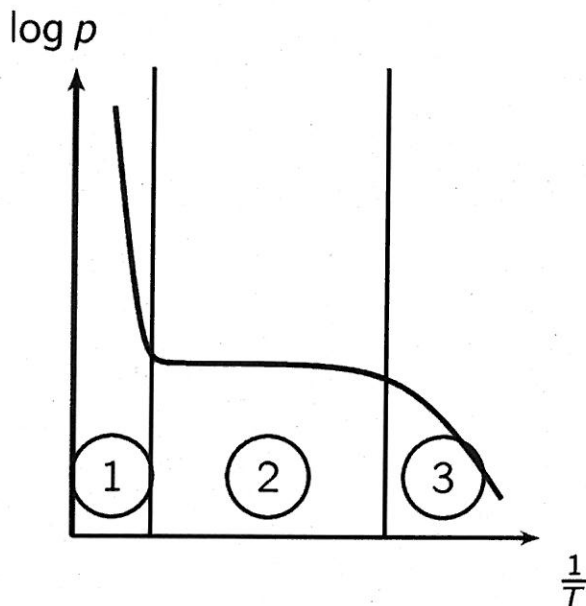
Matr Nr: _____

2. Halbleiterphysik

2.1. Ladungsträgerdichte und Zustand

Bennennen Sie im folgenden Diagramm die drei markierten Bereiche in denen sich ein p-dotierter Halbleiter befinden kann. Geben Sie den Bereich an, der zur Raumtemperatur ($T=300\text{ K}$) gehört und kennzeichnen Sie die Punkte $T = 50\text{ K}$ sowie $T = 1000\text{ K}$ qualitativ im Diagramm. (Skizze, Stichpunkte)

_____ / 5 Punkten erreicht



1: _____

2: _____

3: _____

2.2. Dotierung

Mit welchem Leitfähigkeitstyp müsste ein Halbleiter dotiert sein, um eine geringe Leitfähigkeit zu haben (relativ zum anderen Leitfähigkeitstypen). Begründen Sie Ihre Antwort mit der Formel für die Leitfähigkeit! (Formel, Typ, Begründung)

_____ / 3 Punkten erreicht

Name: _____

Matr Nr: _____

2.3. Strom- und Bilanzgleichungen

Geben Sie die vollständigen Stromgleichungen und die Bilanzgleichungen für beide Ladungsträgertypen an! (*Formeln*)

_____ / 4 Punkten erreicht

2.4. Unschärferelation

Wie lautet die Unschärferelation? (*Formel*)

_____ / 1 Punkten erreicht

2.5. Strahlende Rekombination

Ein Stickstoff dotierter Galliumphosphid Halbleiter hat eine Bandlücke von 2,2 eV. Welche Wellenlänge wird die strahlende Rekombination dieses Halbleiters haben? Benutzen Sie diese vereinfachten Zahlenwerte: Planksches Wirkungsquantum $h = 4,1 \cdot 10^{-15}$ eVs; Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8$ m/s

_____ / 1 Punkten erreicht

Name: _____

Matr Nr: _____

2.6. **Bestimmung des Fermi-niveaus**

Ein mit $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ Arsenatomen (5. Hauptgruppe) pro Kubikzentimeter dotierter Siliziumhalbleiter habe eine Temperatur von 400 K.

Benutzen Sie diese vereinfachten Zahlenwerte:

Die Boltzmannkonstante beträgt $8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$, das Energieniveau von Arsen liegt 130 meV von der Bandkante entfernt; $N_L = N_V = 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; beim intrinsischen Halbleiter liegt das Fermi-Niveau in der Mitte der Bandlücke.

- a) Berechnen Sie, welche Eigenleitungskonzentration sich für den genannten Halbleiter ergibt. Sollten Ihnen dies nicht gelingen, können Sie für die nachfolgenden Aufgaben annehmen, dass $n_i = 3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ist.
- b) Zeichnen Sie in das folgende Koordinatensystem beide Seiten der Ladungsträgerneutralitätsgleichung für diesen Halbleiter vollständig ein. Beschriften Sie die Verläufe!
- c) Wie groß ist die Fermi-Energie für diesen Halbleiter? Der Wert für die Fermi-Energie muss aus Ihrer Grafik hervorgehen!

(Formel, Zahlenwert, Skizze, Zahlenwert)

_____ / 9 Punkten erreicht

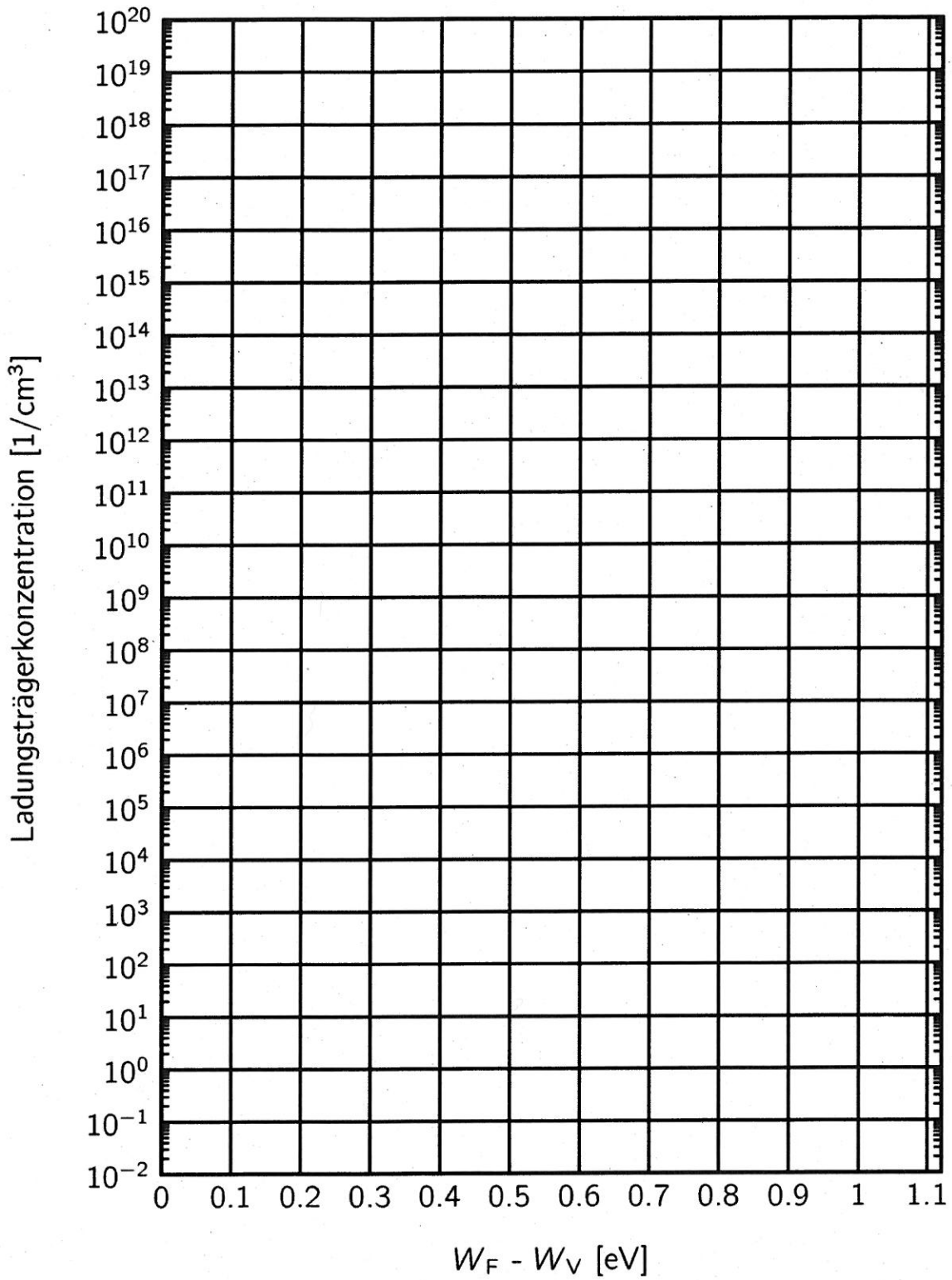
a)

c)

Name: _____

Matr Nr: _____

b)



Gesamt Teil 2: _____ / 23 Punkten erreicht

Name: _____

Matr Nr: _____

3. pn-Übergang

3.1. *Shockley-Bedingungen*

Nennen Sie die drei Shockley-Bedingungen.

_____ / 3 Punkten erreicht

1)

2)

3)

Name: _____

Matr Nr: _____

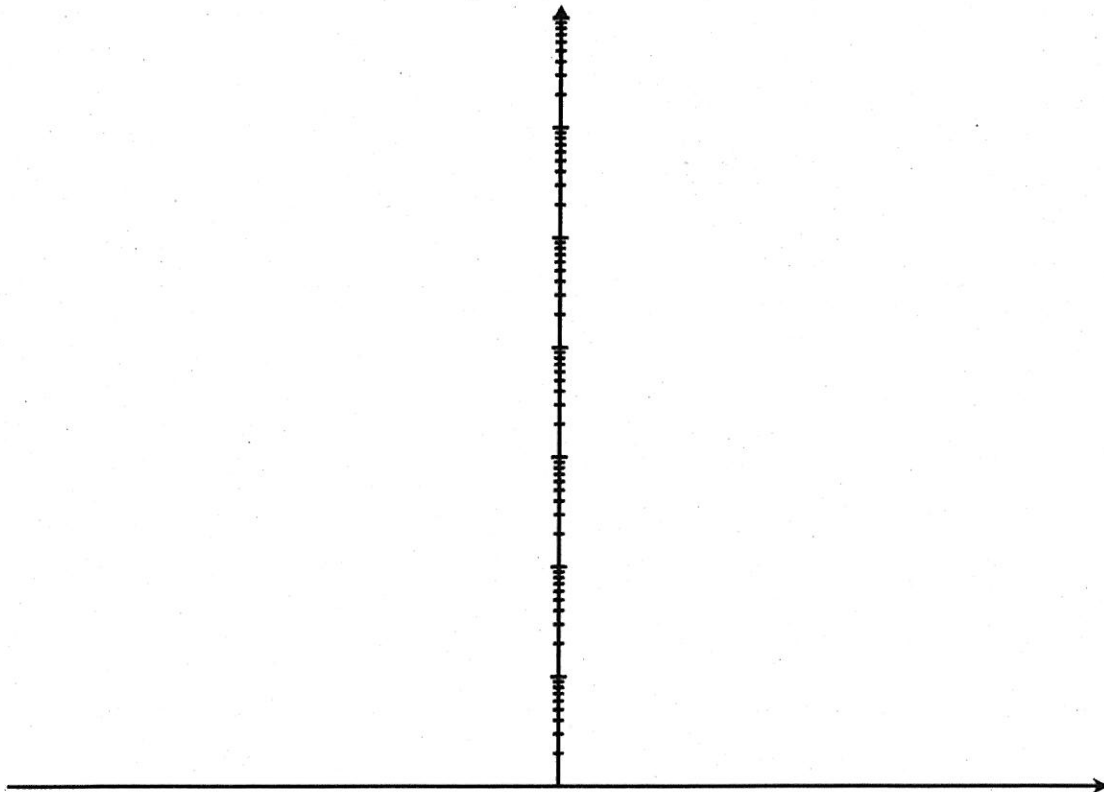
3.2. Kennlinie der Diode

- a) Wie lautet die Kennliniengleichung der Diode nach Shockley? Sie dürfen einen vereinfachten Vorfaktor verwenden.
- b) Zeichnen Sie die Kennlinie der Diode nach Shockley in halblogarithmischer Darstellung in das untenstehende Koordinatensystem für positive und negative Spannungswerte ein. Markieren und benennen Sie dabei auf der Y-Achse den wichtigen Wert der Kennlinie durch den das Sperrverhalten charakterisiert wird. Skizzieren Sie außerdem, wie sich dieser Wert grafisch aus dem Durchlassbereich der Kennlinie ermitteln lässt, bedenken Sie dabei ggf. die Kennliniengleichung! Achten Sie auf die korrekte Beschriftung der Achsen. (Skizze)

_____ / 5 Punkten erreicht

a)

b)



Name: _____

Matr Nr: _____

3.3. Bändermodell

Leiten Sie anhand der folgenden Aufgaben a) - f) das Bändermodell des pn-Übergangs qualitativ her. Der betrachtete pn-Übergang bildet eine p^+n -Diode. Es liegt keine Spannung an.

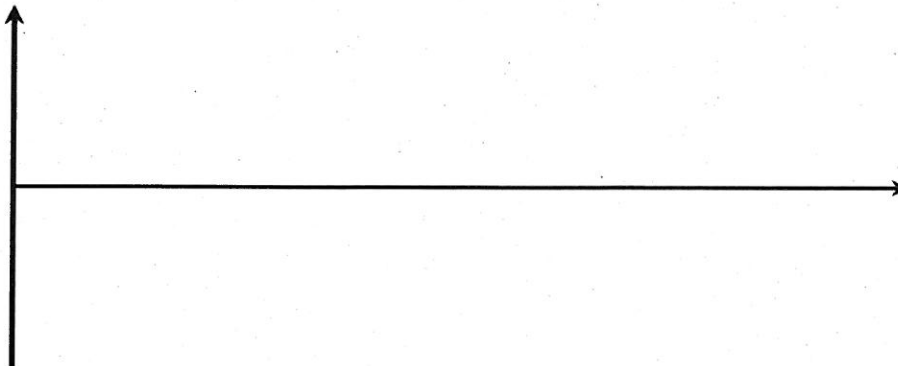
Gehen Sie davon aus, dass keine beweglichen Ladungsträger in der Raumladungszone sind. Weiterhin können Sie annehmen, dass die Ladungsträgerkonzentration außerhalb der Raumladungszone der Gleichgewichtsladungsträgerkonzentration entspricht.

Zeichnen Sie in jedes Diagramm die Punkte $-w_p$ und w_n ein!

- Zeichnen Sie in das erste Koordinatensystem die Raumladung über dem Ort qualitativ ein. Achten Sie auf korrekte Größenverhältnisse bei dieser p^+n -Diode. (Skizze)
- Ausgehend vom ersten Koordinatensystem bilden Sie nun bitte das elektrische Feld im Halbleiter und tragen Sie die resultierende Kurve im zweiten Koordinatensystem ein. (Skizze)
- Welcher mathematische Zusammenhang (qualitativer Verlauf) zwischen Feld und Ort besteht in den einzelnen Bereichen? (Formeln oder Stichpunkte)
- Tragen Sie in das dritte Koordinatensystem den Verlauf des Potentials ein. Markieren und benennen Sie die Höhe des Potentialunterschiedes. (Skizze)
- Welchen qualitativen Verlauf hat das Potential in den einzelnen Bereichen? Mit welcher Beziehung lässt sich das Potential in das Bänderdiagramm überführen? (Formeln, ggf. Stichpunkte)
- Tragen Sie nun in das letzte Koordinatensystem das vollständige Bändermodell des p^+n -Übergangs ein! (W_L , W_V , W_i , W_F , Gebiet der RLZ) (Skizze)

_____ / 7 Punkten erreicht

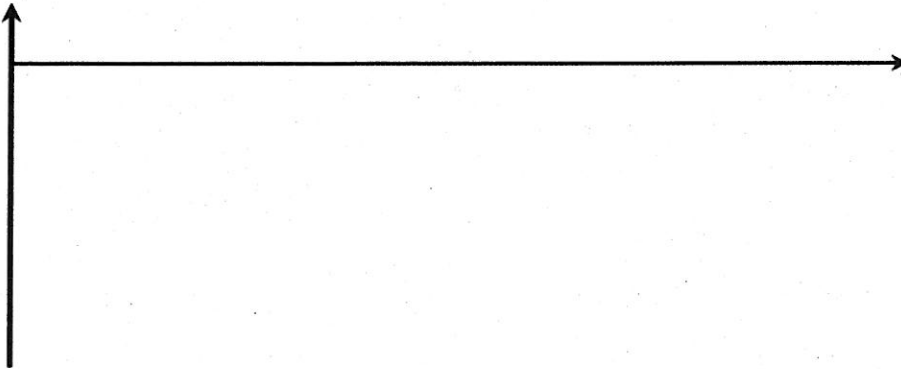
a)



Name: _____

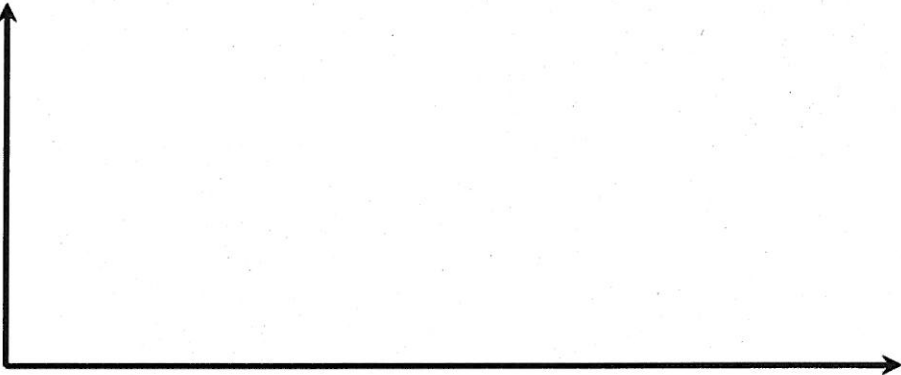
Matr Nr: _____

b)



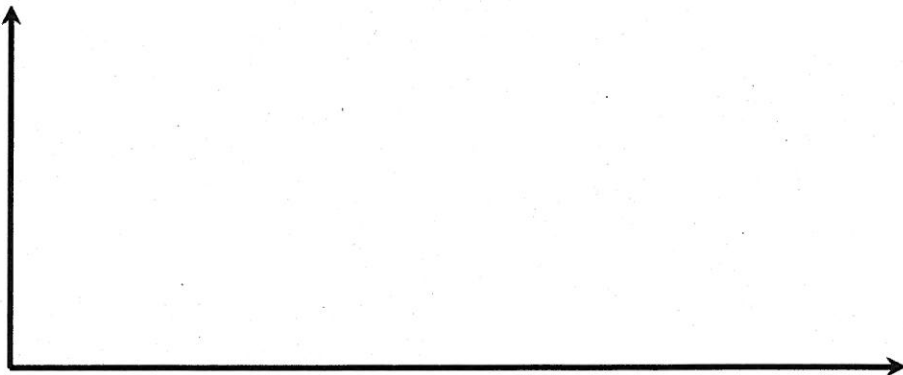
c)

d)



e)

f)



Name: _____

Matr Nr: _____

3.4. Ladungsträgerkonzentrationen am pn-Übergang

- a) Zeichnen Sie den Verlauf der logarithmischen Ladungsträgerkonzentrationen einer pn^+ -Diode ($N_A = 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $N_D = 10^{18} \text{cm}^{-3}$) außerhalb der Raumladungszone im Gleichgewichtsfall ($U = 0 \text{V}$) in folgende Abbildung ein und benennen Sie alle relevanten Größen! Achten Sie auf die korrekte Beschriftung Ihrer Zeichnung, markieren Sie den Nullpunkt auf der x-Achse.

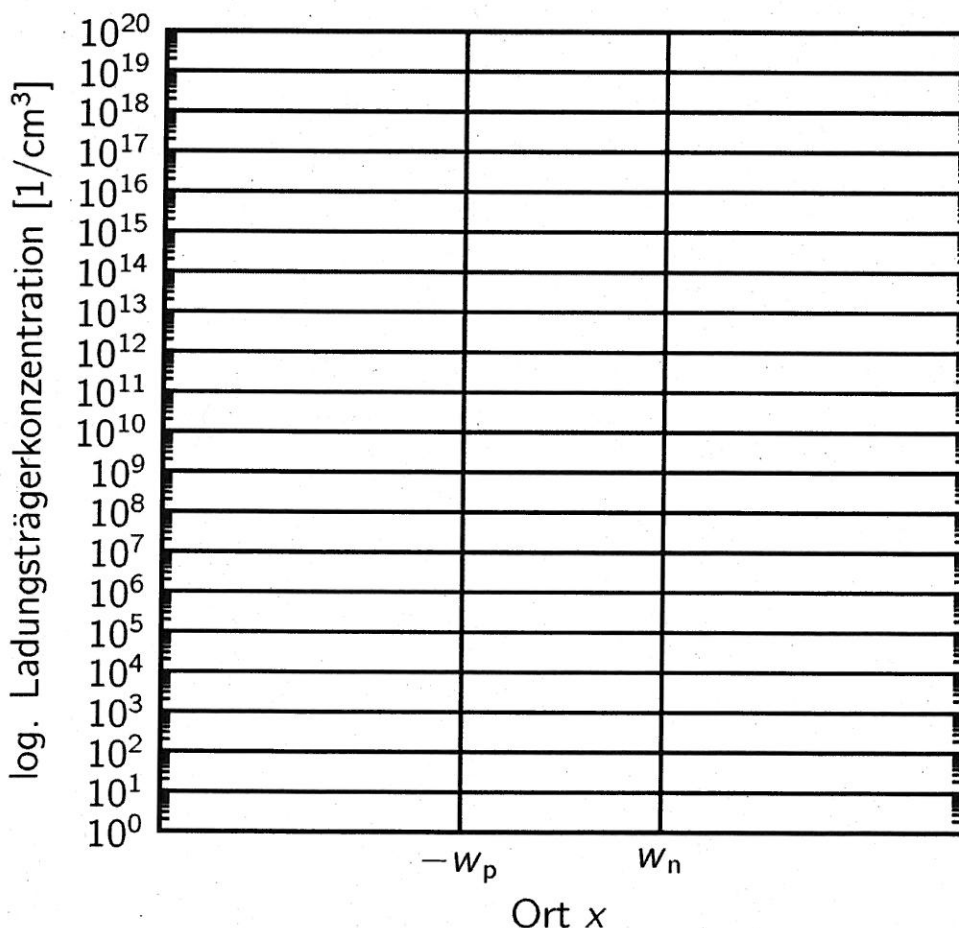
Hinweis: $T = 300 \text{K}$ und Zahlenwerte für p_{n0} & n_{p0} beachten! (Skizze)

An den pn^+ Übergang wird jetzt eine Durchlassspannung von $U = 0,419 \text{V}$ angelegt! (Hinweis: $U_T(300 \text{K}) \approx 26 \text{mV}$)

- b) Wie lassen sich die Minoritätsträgerkonzentrationen an beiden Sperrschicht-rändern berechnen? Nennen Sie die genauen Formeln, berechnen Sie die Konzentrationen (auf der nächsten Seite) und tragen Sie die resultierenden Verläufe mit in die Abbildung ein. (Formeln, Rechnung, Skizze)

_____ / 7 Punkten erreicht

a)



Name: _____

Matr Nr: _____

b)

3.5. Diffusionskapazität

Erklären Sie anhand von Stichpunkten die Diffusionskapazität eines pn-Übergangs. Gehen Sie anhand der folgenden Unteraufgaben vor:

- a) In welchem Spannungsbereich wirkt sich diese Kapazität auf das Bauteilverhalten aus? (Ungleichung)
- b) Beschreiben Sie stichpunktartig die Vorgehensweise zur Berechnung der Diffusionskapazität. (Stichpunkte)
 - Überlegen Sie sich, wie Sie eine Kapazität alg. berechnen
 - Bezeichnen Sie die in der Gleichung vorkommenden Größen mit Größen aus dem pn-Übergang
 - Wie ist der relative Zusammenhang zwischen C_{diff} und U (Relationsgleichung)

_____ / 4 Punkten erreicht

a)

b)

Gesamt Teil 3: _____ / 26 Punkten erreicht

Name: _____

Matr Nr: _____

4. Bauelemente

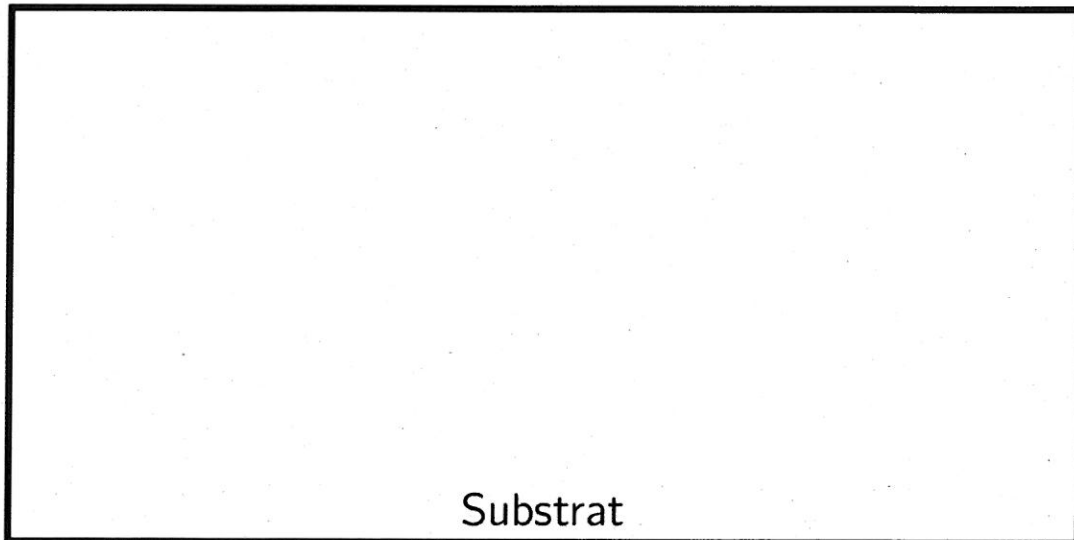
4.1. MOSFET – Funktionsweise

Erläutern Sie die Funktionsweise des MOSFET anhand der folgenden Fragen.

- a) Zeichnen Sie den zweidimensionalen Querschnitt eines n-MOSFET in Planartechnologie. Benennen Sie die Anschlüsse und markieren Sie die einzelnen Dotierstofftypen (n, p) sowie ihre Konzentration (niedrig/-, mittel, hoch/+, sehr hoch/++). Zeichnen Sie den wichtigsten Technologieparameter des MOS Transistors. Achten Sie darauf, dass Ihr MOSFET in Planartechnologie hergestellt werden kann! (Skizze)

_____ / 4 Punkten erreicht

a)



Name: _____

Matr Nr: _____

4.2. Ausgangskennlinienfeld MOSFET

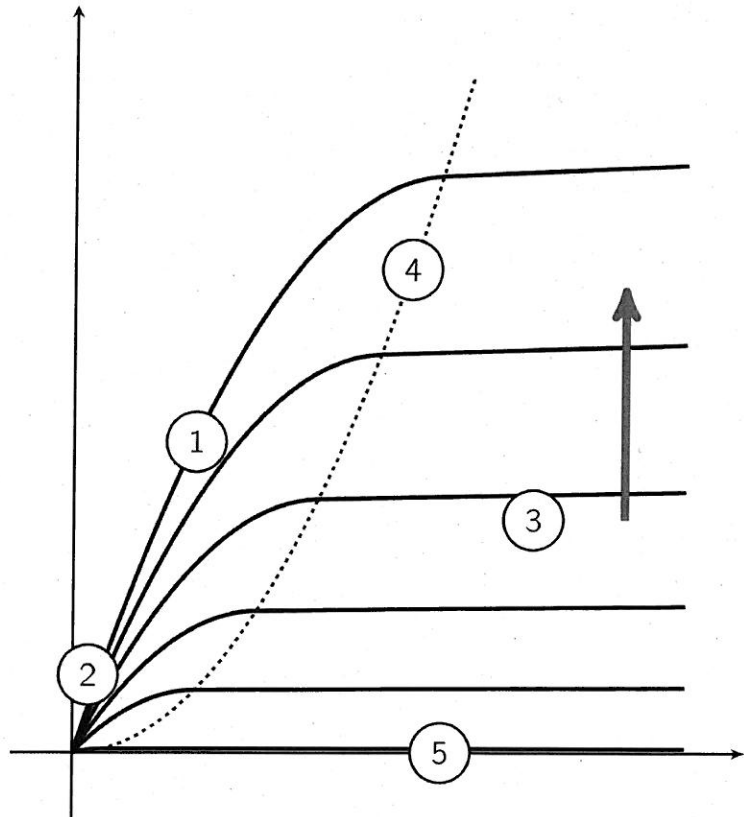
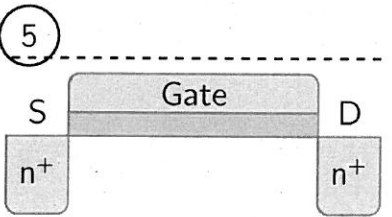
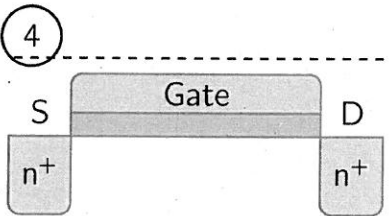
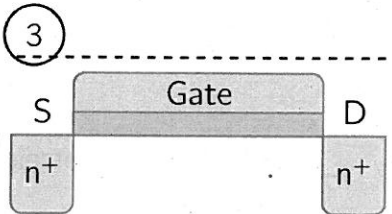
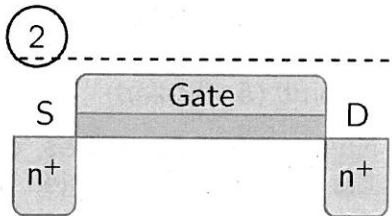
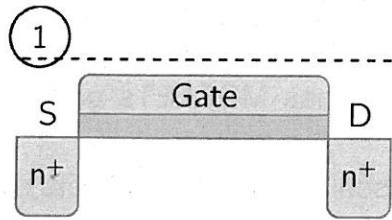
Im folgenden Diagramm ist ein Ausgangskennlinienfeld eines MOSFETs gegeben (Nummerierung der Bereiche ist willkürlich).

- a) Tragen Sie die fehlenden Beschriftungen der Achsen und des Parameters ein. (Skizze)
- b) Zeichnen Sie in den vorbereiteten MOSFET-Kanalbereichen die fünf möglichen Verläufe des Inversionskanals ein. Achten Sie dabei darauf, dass die Nummerierung mit dem Kennlinienfeld übereinstimmt! (5 Skizzen)
- c) Schreiben Sie zu jedem dieser Verläufe den Namen des Bereiches der Ausgangskennlinie neben der Nummer auf die gestrichelte Linie. (5 Stichpunkte).
- d) Welche Kennliniengleichungen gelten für die Bereiche 1 und 3? Tragen Sie die Kennlinien in die Tabelle ein. Sie können einen vereinfachten Vorfaktor verwenden. (Formeln)

_____ / 8 Punkten erreicht

Name: _____

Matr Nr: _____



Bereich der Kennlinie	Kennliniengleichung (ggf. vereinfacht)
1	
3	

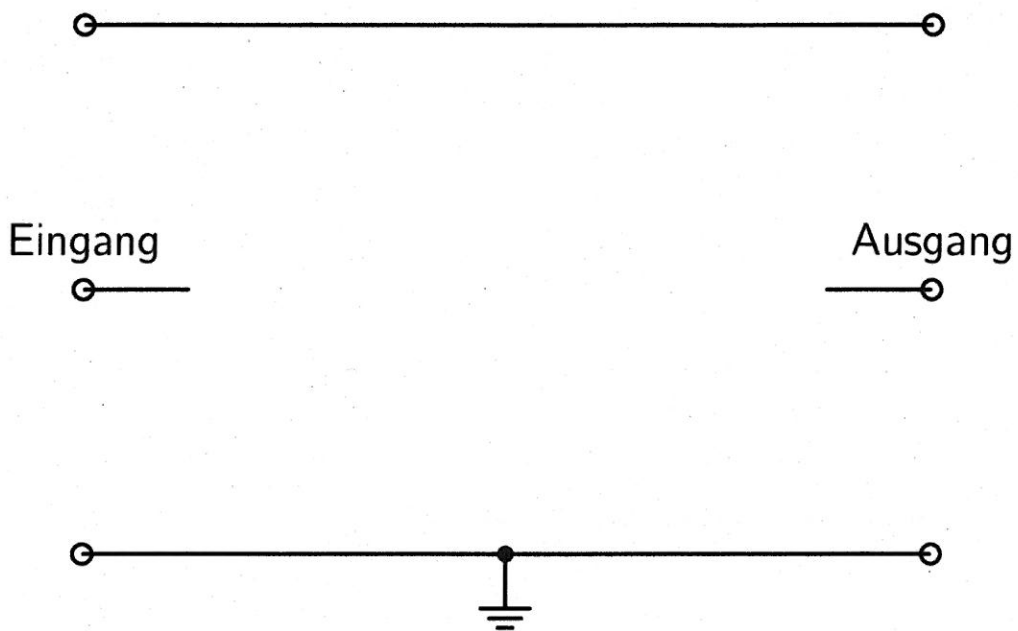
Name: _____

Matr Nr: _____

4.3. CMOS Inverter

Vervollständigen Sie das Schaltbild des CMOS Inverters und notieren Sie die Typen der verwendeten Transistoren im Schaltbild. Benennen Sie bei allen Transistoren Source, Drain und Gate.

_____ / 4 Punkten erreicht



Name: _____

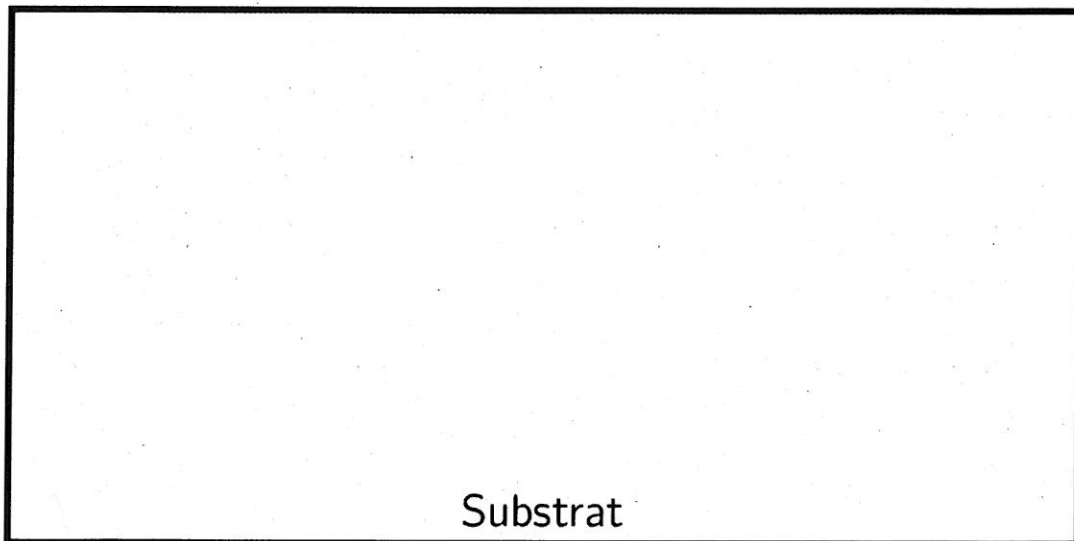
Matr Nr: _____

Bipolartransistor

- a) Zeichnen Sie den Querschnitt eines npn-Transistors in Planartechnologie und bezeichnen Sie die einzelnen Kontakte des Transistors. Notieren Sie die Dotierstofftypen (n, p) und Konzentration (niedrig/-, mittel, hoch/+, sehr hoch/++) in den entsprechenden Gebieten. (Skizze)
- b) Markieren Sie den wichtigsten Technologieparameter in Ihrer Zeichnung. (Skizze, Formelzeichen)
- c) Beschalten Sie den Transistor nun in Basisschaltung. Notieren Sie Bezeichnungen und Vorzeichen ($>0V$ oder $<0V$) der verwendeten Spannungen.
- d) Welche Ströme setzt der Emitterwirkungsgrad in Beziehung zueinander, wie ist diese Beziehung? Welche Werte erwarten Sie für einen guten Emitterwirkungsgrad? (Beschreibung oder Formel)

_____ / 6 Punkten erreicht

a + b + c)



d)

Gesamt Teil 4: _____ / 22 Punkten erreicht