

Name, Vorname: _____

Matrikelnummer: _____

Klausur Halbleiterbauelemente

WS 19/20

26.02.2020

Bitte lesen Sie sich zuerst die folgenden Anmerkungen gründlich durch:

- **Zunächst** tragen Sie bitte Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer auf dem Deckblatt ein.
- Die Bearbeitungszeit der Klausur beträgt 150 min.
- Benutzen Sie keine roten Stifte.
- Lesen Sie bitte vor dem Beginn der Bearbeitung die einzelnen Aufgaben *vollständig* durch. Viele Aufgaben haben zunehmendem Schwierigkeitsgrad in den Teilaufgaben. Es gibt für alle Teilleistungen Punkte.
- Geben Sie die Aufgaben in sortierter Reihenfolge ab.
- und nun: **viel Erfolg!**

Aufgabe:	1	2	3	4	5	Σ
Maximale Punkte:	7	11	9	17	7.5	51.5
Erreichte Punkte:	_____	_____	_____	_____	_____	_____

Note: _____

Name: _____

Matrikelnummer: _____

1 Multiple Choice Aufgaben

7 Punkte

Aufgabe 1.1)

Bitte kreuzen Sie an, ob folgende Aussagen zutreffen! Setzen Sie pro Aussage maximal 1 Kreuz. Je richtig gesetzter Ankreuzung bei „trifft zu“ oder „trifft **nicht** zu“ erhalten Sie 1 Punkt. Sollten Sie sich nicht sicher sein, können Sie „ungewiss“ ankreuzen, für jeweils zwei „ungewiss“ Ankreuzungen erhalten Sie 0.5 Punkte. Für falsche Ankreuzungen oder Mehrfachankreuzungen erhalten Sie 0 Punkte.

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

Nr	Aussage	trifft zu	ungewiss	trifft nicht zu
1	In Störstellenreserve verliert die Dotierung eines Halbleiters vollständig ihre Wirkung.	[]	[]	[]
2	Ein elektrisches Feld führt zu einem Diffusionsstrom.	[]	[]	[]
3	Die Diffusionskapazität eines pn-Übergangs wird durch die beweglichen Minoritätsladungsträger in den Bahngebieten gebildet.	[]	[]	[]
4	Der Boltzmannfaktor beschreibt die Konzentration der Minoritätsladungsträger am Rand der Raumladungszone.	[]	[]	[]
5	In einem unbeleuchteten pn-Übergang befinden sich in der Raumladungszone keine beweglichen Ladungsträger.	[]	[]	[]
6	Minoritätsladungsträger werden beim Feldstrom typischerweise vernachlässigt.	[]	[]	[]
7	Der Anteil der Raumladung und angrenzenden Inversionsladung an der Varaktorkapazität sind in Reihe geschaltet.	[]	[]	[]

_____ / 7 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Falls nicht anders angegeben, können Sie folgende Parameter und Konstanten für die Berechnungen in dieser Klausur annehmen:

Temperatur	$T = 300 \text{ K}$
Boltzmann-Konstante	$k_B = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$
absolute Dielektrizitätskonstante	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$
Elementarladung	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
effektive Zustandsdichten in Si	$N_V, N_C = 1 \cdot 10^{19} / \text{cm}^3$
Planksches Wirkungsquantum	$h = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$
Lichtgeschwindigkeit	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Bandabstand Silizium	$W_{\text{gap}} = 1,12 \text{ eV}$

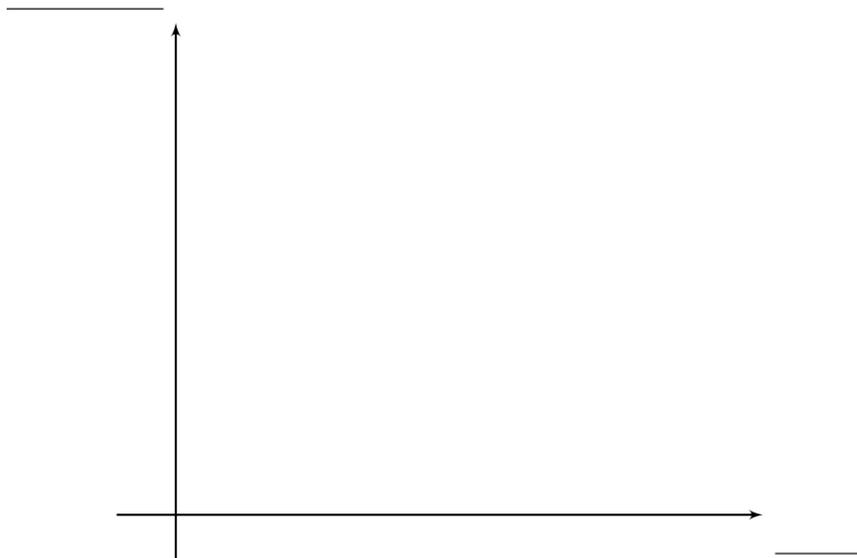
2 Halbleiterphysik

11 Punkte

Aufgabe 2.1) Bändermodell

Skizzieren Sie in das folgende Koordinatensystem das vollständige Bändermodell eines n-Halbleiters für $T = 800 \text{ K}$ ein. Benennen Sie hierzu alle fünf Energieniveaus. Achten Sie auf die Beschriftung der Achsen und der Energieniveaus!

(Skizze, Beschriftung)



_____ / 2.5 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 2.2)

1. Welche Verteilungsfunktion wird zur **exakten** Bestimmung von Ladungsträgerkonzentrationen im Halbleiter verwendet? (keine Näherung der Verteilungsfunktion)
(Name, Formel)
2. Unter welchen Umständen kann eine genäherte Funktion genutzt werden, wenn der erlaubte Fehler $< 1\%$ ist?
(Stichpunkt)
3. Wie lautet die genäherte Formel?
(Name, Formel)

_____ / 2.5 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 2.3)

1. Berechnen Sie die intrinsische Ladungsträgerkonzentration eines Silizium-Halbleiters bei einer Temperatur von 400 K.
(*Formel, Zahlenwert*)
2. Wie hoch müsste ein p-Halbleiter dotiert sein, so dass es hundertmal mehr Majoritätsladungsträger als Minoritätsladungsträger gibt? Vorausgesetzt wird eine intrinsische Ladungsträgerdichte von $3 \cdot 10^{11}/\text{cm}^3$.
(*Formel, Wert*)

_____ / 3 Punkte

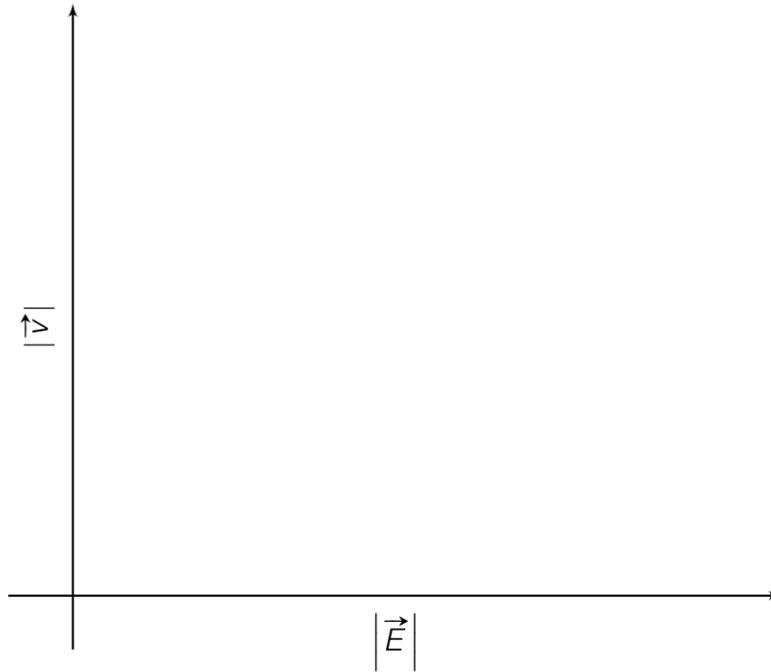
Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 2.4) Ladungstransport

Skizzieren Sie im untenstehenden Koordinatensystem qualitativ die Geschwindigkeit beider Ladungsträgertypen in einem intrinsischen Silizium-Halbleiter in Abhängigkeit des angelegten elektrischen Feldes. Markieren Sie den Bereich kleiner elektrischer Feldstärke (ohmschen Bereich) und erläutern Sie, welcher proportionaler Zusammenhang dort gilt.

(Skizze, Stichpunkt(e) / Relation)



_____ / 2 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 2.5)

Was ist der mikroskopische physikalische Mechanismus für den makroskopischen (gerichteten) Teilchentransport bei Diffusion/Diffusionsstrom?

(*Stichpunkt(e), Abbildung möglich*)

_____ / 1 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

3 pn-Übergang

9 Punkte

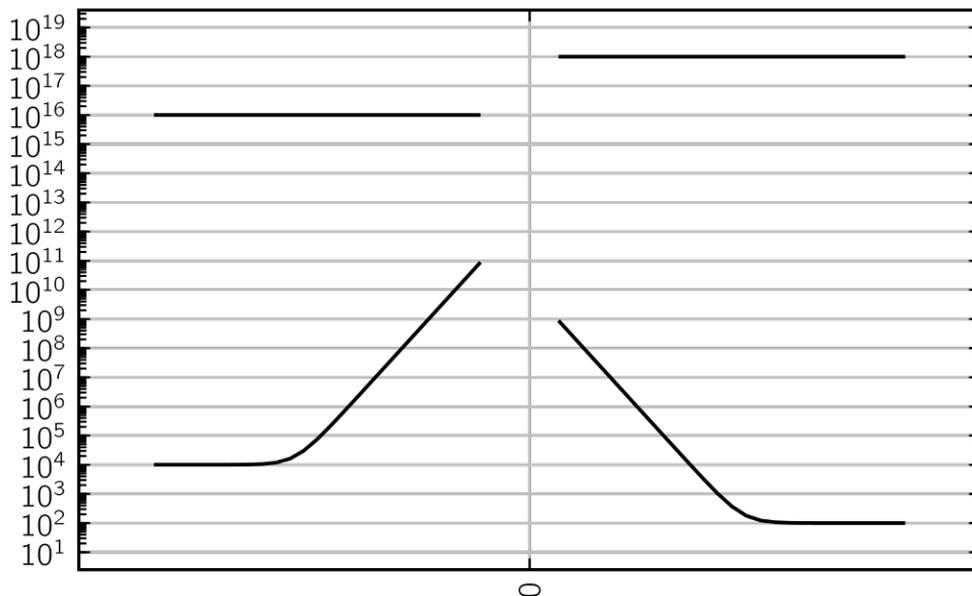
Aufgabe 3.1)

Ein mit 0,4 V in Durchlassrichtung betriebener pn -Übergang habe den folgenden Ladungsträgerverlauf. Das p-Gebiet ist mit 10^{16} Akzeptoren dotiert.

- Verdeutlichen Sie, in welche Richtung der technische Strom für diesen Fall fließt. Durch welchen Mechanismus kann man den Stromfluss vereinfacht modellieren?
(Skizze, Stichpunkt)

Nun wird der pn-Übergang zusätzlich beleuchtet. Die dadurch entstehende Überschussladungsträgerkonzentration in den Bahngebieten beträgt $1 \cdot 10^{14}/\text{cm}^3$. Sie dürfen dabei annehmen, dass am Rand der Raumladungszone die üblichen Boltzmann-Randwertbedingungen gelten und an den Rändern keine Kontakte oder Oberflächenrekombination vorhanden sind.

- Tragen Sie in das Koordinatensystem den Ladungsträgerkonzentrationsverlauf für den beleuchteten pn-Übergang ein.
(Skizzen)
- Als was arbeitet dieser pn-Übergang?
(Stichwort)
- In welche Richtung fließt der Strom der photogenerierten Ladungsträger?
(Stichwort)



Name: _____ Matrikelnummer: _____

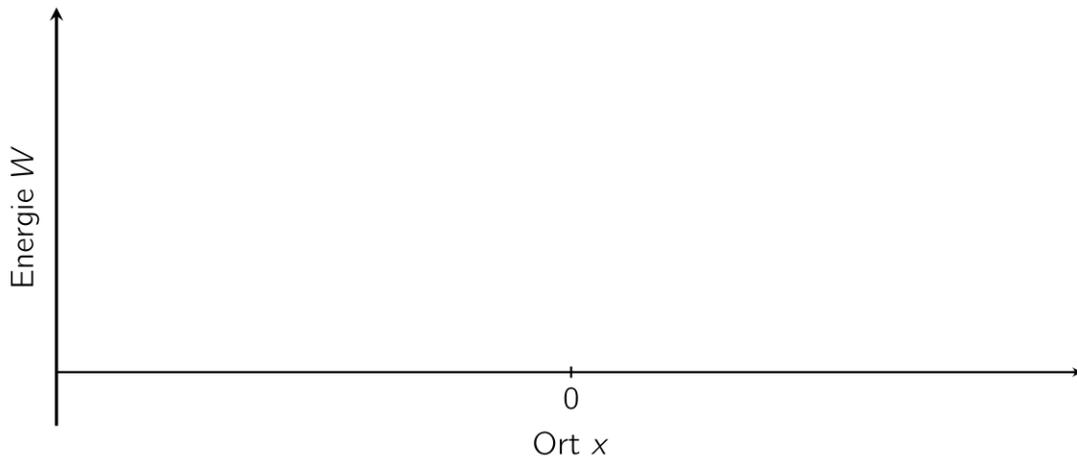
_____ / 3.5 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 3.2)

Zeichnen Sie das Energiebändermodell eines pn-Übergangs nach Shockley im thermodynamischen Gleichgewicht in das vorbereitete Diagramm. Markieren Sie das n- und p-Gebiet sowie die Raumladungszone in Ihrer Skizze. Markieren Sie, wo Sie in Ihrer Skizze $e \cdot U_D$ finden.
 (Skizze, Beschriftung, Markierung)



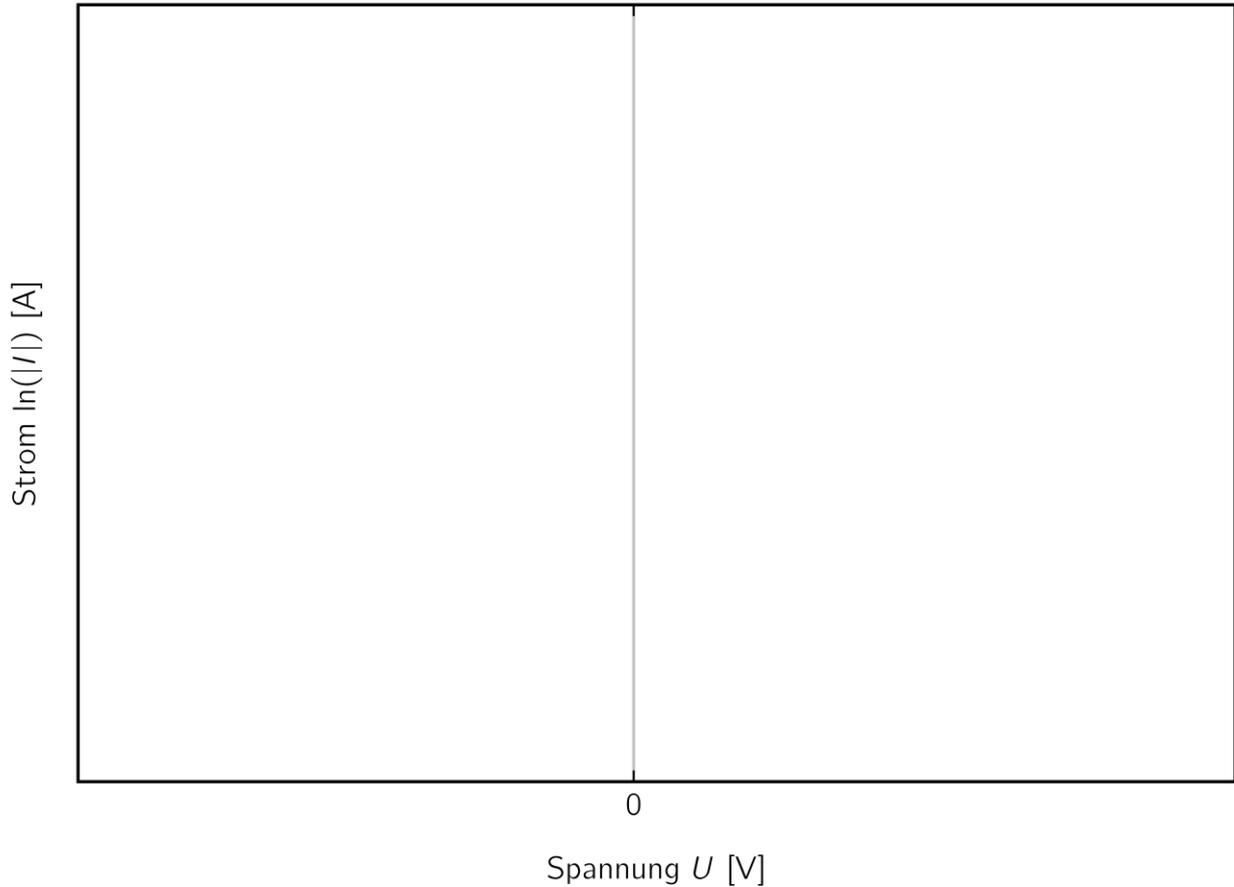
_____ / 2.5 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 3.3) Kennlinie der Diode

- Zeichnen Sie die Kennlinie einer realen Diode in halblogarithmischer Darstellung in das untenstehende Koordinatensystem für positive und negative Spannungswerte ein. Bezeichnen Sie alle Bereiche eindeutig.
(Skizze mit Bereichen und Bezeichnungen)



_____ / 3 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

4 Bauelemente

17 Punkte

Aufgabe 4.1)

Warum gibt es keine verlustarme bipolare Logik vergleichbar zur Standard-CMOS-Logik?
(Stichpunkt)

_____ / 1 Punkte

Aufgabe 4.2)

Nennen Sie die wesentlichen Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Aufbau und Stromtransport eines MOS- und Bipolartransistors. Nehmen Sie ideale Bauelemente an.
(min. 5 Stichpunkte)

Name: _____ Matrikelnummer: _____
_____ / 2.5 Punkte

Aufgabe 4.3)

Wie wird der Zustand der Bandverbiegung genannt, der einen leitfähigen Kanal unter dem Gate eines MOSFETs erzeugt?
(Stichpunkt)

_____ / 1 Punkte

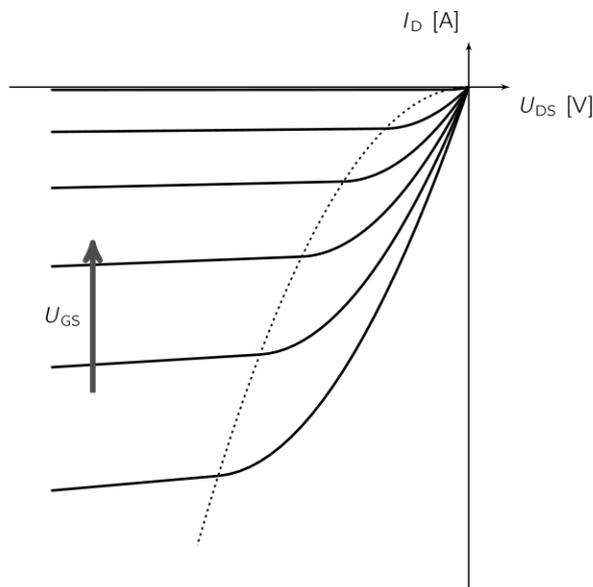
Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 4.4)

Gegeben ist das Ausgangskennlinienfeld eines MOSFETs.

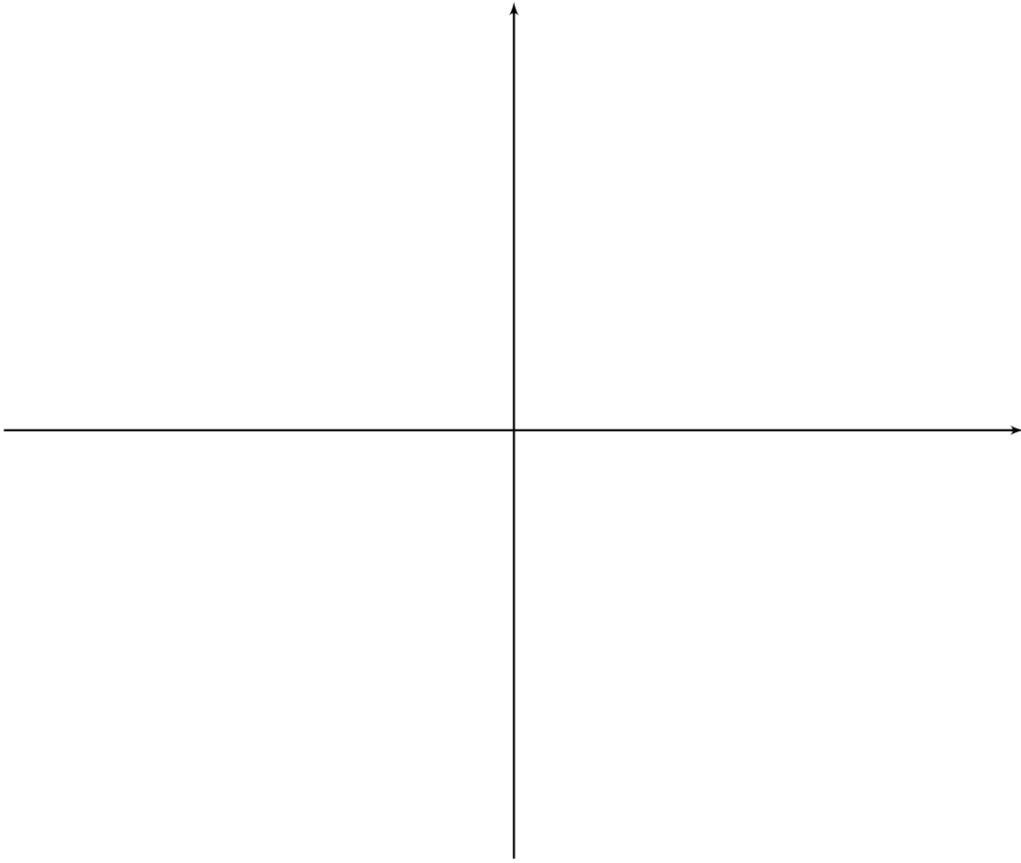
1. Skizzieren Sie die zugehörige Übertragungskennlinie¹ dieses MOSFETs in das noch freie Koordinatensystem ein (Nur eine Kennlinie!). Um welchen Transistortyp handelt es sich? Achten Sie auf Achsenbeschriftung.
(Skizze)
2. Machen Sie den proportionalen Zusammenhang zwischen den Werten auf der x- und y-Achse in den zwei von Null verschiedenen Bereichen der Übertragungskennlinie deutlich.
(Beschriftung)
3. Bezeichnen Sie die Abszissen (x) -Werte, welche die unterschiedlichen Bereiche der Kennlinie voneinander trennen.
(2 Werte)
4. Beschriften Sie die drei Bereiche der Kennlinie mit dem jeweiligen Arbeitspunkt des Transistors.
(Beschriftung)



¹Auch als Eingangskennlinie bezeichnet

Name: _____

Matrikelnummer: _____



_____ / 6 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 4.5)

1. Aus welchen Kennlinien werden Steilheit und Ausgangsleitwert (inverser Ausgangswiderstand $\frac{1}{r_{DS}}$) bestimmt und welcher Parameter wird dabei jeweils festgehalten?
2. Wie sind dementsprechend Steilheit g_m und der Ausgangsleitwert g_{DS} eines MOSFETS definiert?
(*Formeln*)

_____ / 2 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 4.6)

In welchen Betriebsbereichen wird der MOSFET als Schalter in einem digitalen CMOS-Schaltkreis *stationär* betrieben?

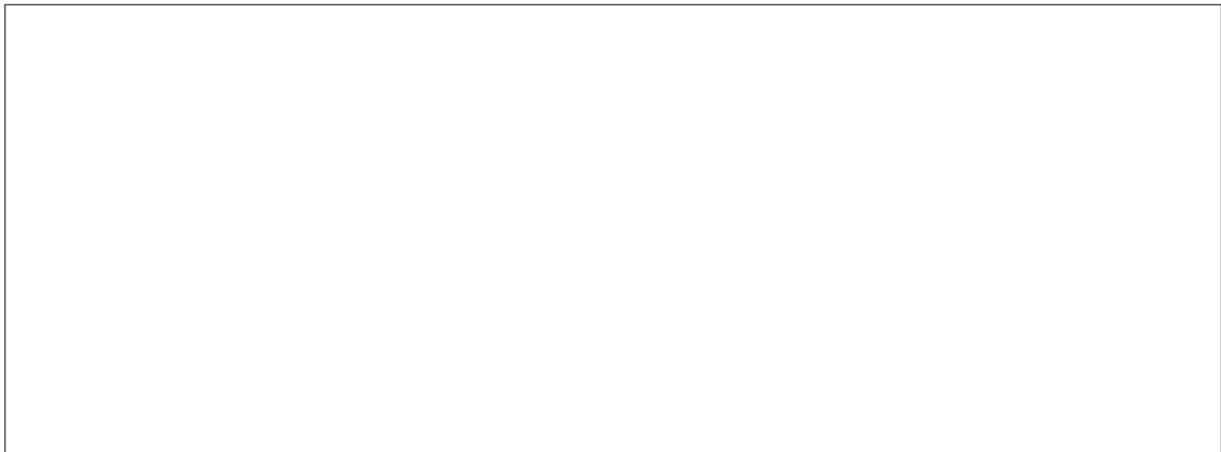
(zwei Bereiche)

_____ / 1 Punkte

Aufgabe 4.7)

Skizzieren Sie den schematischen Aufbau eines in Planartechnologie hergestellten bipolaren pnp-Transistors. Benennen Sie die einzelnen Kontakte und die Dotierstofftypen (z.B. n^{++} , p^+ , usw). Zeichnen Sie außerdem die wichtigste(n) geometrische(n) Größe(n) (Technologieparameter) dieser Anordnung ein.

(Skizze)



_____ / 3.5 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

5 Praktikumsfragen

7.5 Punkte

Aufgabe 5.1)

Wie lautet der funktionale Zusammenhang des Abklingverhaltens der Überschussladungsträgerkonzentration zur Zeit (Proportionalität genügt)?

(Formel)

_____ / 0.5 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 5.2)

Skizzieren Sie die Diodenkennlinie nach Shockley in halblogarithmischer Darstellung. Bestimmen Sie an Hand Ihrer Skizze qualitativ den Sperrsättigungsstrom.

(Skizze)

_____ / 2 Punkte

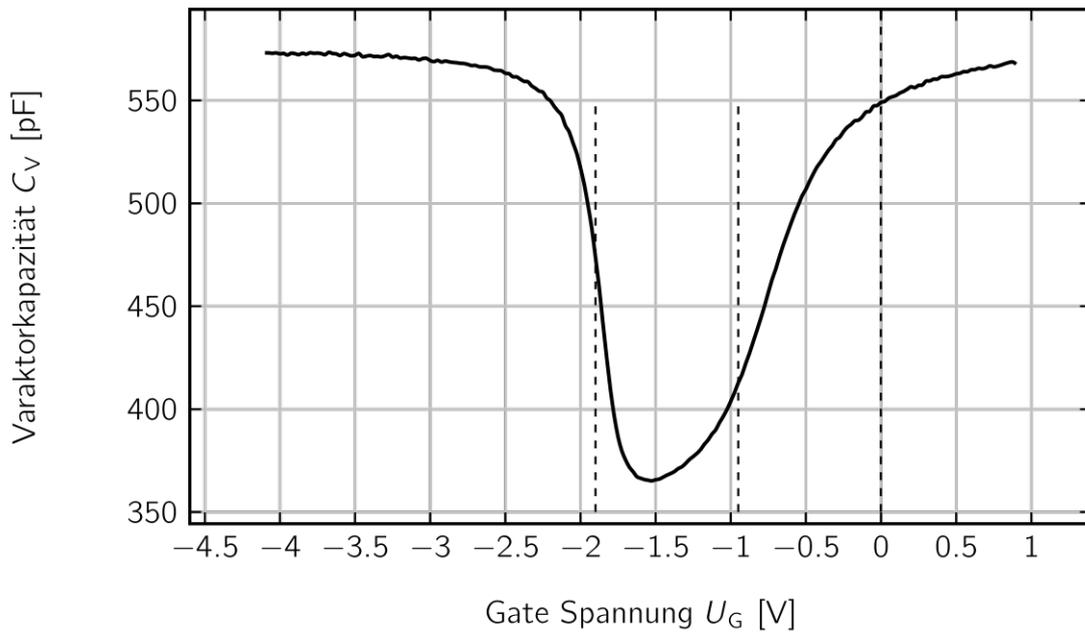
Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 5.3)

Im folgenden Diagramm ist die gemessene Kapazität eines MOS-Varaktors in einer n-Umgebung zu sehen. Ordnen Sie den vorgegebenen Bereichen im Diagramm folgende Zustände zu: starke Inversion, Inversion, Verarmung, Anreicherung.

(Bezeichnung)



_____ / 2 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 5.4)

Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild einer realen MOS-Varaktorkapazität, benennen Sie alle Bauteile.

(Schaltbild)

_____ / 1 Punkte

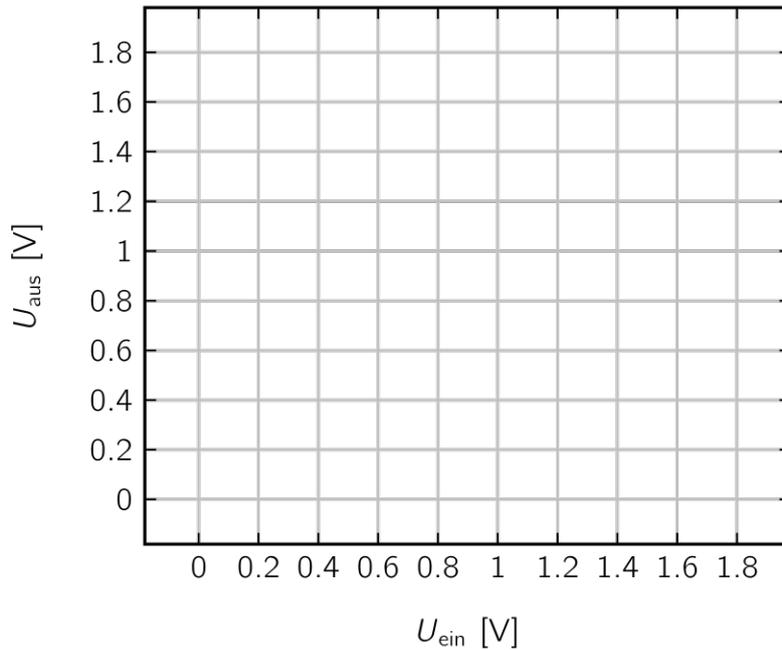
Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 5.5)

Zeichnen Sie die reale Übertragungskennlinie eines übertragungssymmetrischen CMOS Inverters. Der Inverter wird mit einer Betriebsspannung (U_B) von 1,8V betrieben.

(Skizze, Bezeichnung)



_____ / 1 Punkte

Aufgabe 5.6)

Beschreiben Sie kurz die Bestimmung des Serienwiderstandes einer Solarzelle. Sie können auch eine Skizze zur Hilfe nehmen.

(Stichpunkt)

_____ / 1 Punkte

Name: _____ Matrikelnummer: _____

— **Ende der Aufgaben** —