

Name, Vorname: _____

Matrikelnummer: _____

Klausur Halbleiterbauelemente

WS 19/20 II 07.07.2020

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:	6	11.5	9.5	15.5	8.5	51
Erreichte Punkte:	_____	_____	_____	_____	_____	_____

Note: _____

Name: _____

Matrikelnummer: _____

1 Multiple Choice Aufgaben

6 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	Das Fermienergielevel eines mit Bor (3. HG) dotierten Halbleiters ist höher als das intrinsische Fermienergielevel	[]	[]	[]
2	Der Feldstrom der Löcher und Elektronen haben das gleiche Vorzeichen	[]	[]	[]
3	Der Diffusionsstrom wird von einer äußeren Kraft getrieben	[]	[]	[]
4	Der Strom im Kanal eines MOSFETs ändert sich längs des Kanals	[]	[]	[]
5	Der Varaktor für einen n-MOSFET wird mit n-Substrat gebildet	[]	[]	[]
6	Generation in einem dotierten Halbleiter führt gleichermaßen zur Erhöhung der Majoritätsträgerkonzentration und Minoritätsträgerkonzentration	[]	[]	[]

_____ / 6 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

11.5 Punkte

Aufgabe 2.1)

Geben Sie die Bilanzgleichung bzw. Kontinuitätsgleichung für Elektronen an. Erläutern Sie die physikalische Bedeutung jedes Terms inklusive des Vorzeichens.

(Formel mit Erläuterung für jeden Term.)

_____ / 3.5 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 2.2)

Betrachten Sie die Minoritätsladungsträger in einem eindimensionalen p-Halbleiter ohne extern eingprägtes Feld, bei dem auf der einen Seite bei $x = 0$ auf irgendeine Art die Minoritätsladungsträgerkonzentration auf einen Wert \hat{n}_p angehoben wird, während die andere Seite $x \rightarrow \infty$ auf Gleichgewichtsniveau n_{p0} bleibt.

1. Leiten Sie die stationäre Diffusionsgleichung der Minoritätsladungsträger durch Kombination von Bilanzgleichung und Stromgleichung her.
(Formel)
2. Geben Sie die Lösung dieser Gleichung an, die die Randwerte erfüllt.
(Formel)

_____ / 3.5 Punkte

Name: _____ Matrikelnummer: _____

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 2.3)

Die Majoritätsladungsträgerkonzentration in einem n-leitenden Halbleiter ist $1 \cdot 10^8$ größer als die Minoritätsladungsträgerkonzentration ($N_{\text{maj}} = 1 \cdot 10^8 \cdot N_{\text{min}}$). Wie groß sind die Konzentrationen der Elektronen und Löcher bei Raumtemperatur? Geben Sie die zugehörige Bestimmungsgleichung an.

(Formel, Zahlenwerte)

_____ / 1.5 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 2.4)

Gegeben ist folgendes hypothetisches Halbleiterkonstrukt:

In einen Siliziumhalbleiter wurden folgende Stoffe dotiert: Gallium (dritte Hauptgruppe) mit einer Konzentration von $5 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3$ sowie Arsen (fünfte Hauptgruppe) ebenfalls mit einer Konzentration von $5 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3$. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Abstände vom Energieniveaus der beiden Dopanden zur Mitte der Bandlücke hin identisch sind.

1. Wo liegt das Fermi-Niveau für diesen Halbleiter?
(*Stichpunkt*)
2. Wie lässt sich die intrinsische Ladungsträgerdichte in Abhängigkeit von der Temperatur berechnen?
(*Formel*)

_____ / 1 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 2.5)

Betrachten Sie zwei separate Halbleiter, einen n-dotierten und einen p-dotierten Silizium-Halbleiter. Beide Halbleiter sind jeweils gleich stark dotiert ($N_A = N_D$). Welcher der beiden Halbleiter hat die geringere Leitfähigkeit? Warum?

(Typ, Erläuterung)

_____ / 1 Punkte

Aufgabe 2.6)

Ein Galliumnitrid Halbleiter hat eine Bandlücke von 3,39 eV. Welche Wellenlänge wird die strahlende Rekombination dieses Halbleiters haben?

_____ / 1 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

3 pn-Übergang

9.5 Punkte

Aufgabe 3.1)

Wie lauten die drei Shockley-Bedingungen zur Bestimmung der Kennliniengleichung eines pn-Übergangs? Nennen Sie die mit der jeweiligen Bedingung verbundene Vereinfachung bei der Berechnung der $I(U)$ Kennlinie. Falls möglich, können Sie Korrekturmaßnahmen für eine realistischere Kennlinie nennen.

(Drei Stichpunkte mit Begründungen)

Name: _____ Matrikelnummer: _____

_____ / 3 Punkte

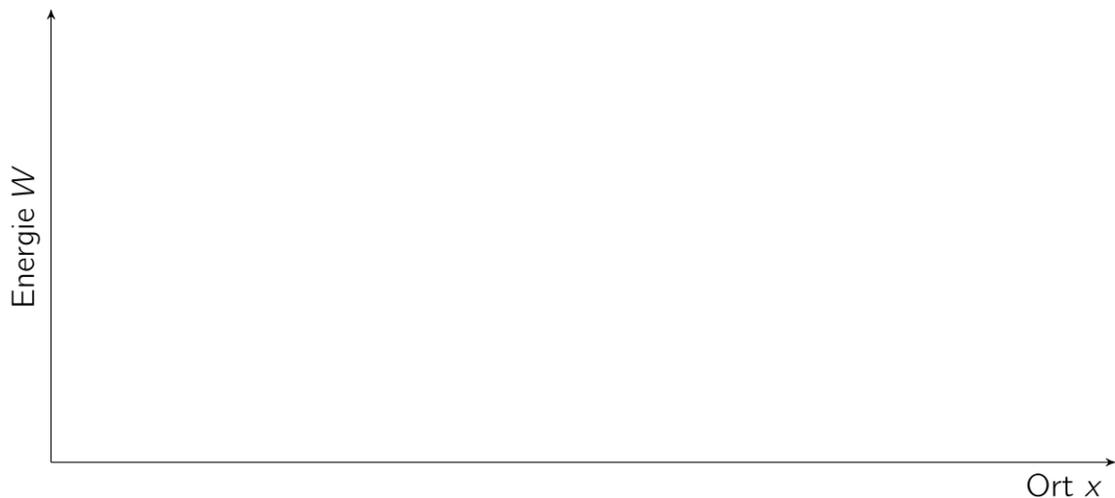
Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 3.2)

Betrachtet wird ein pn-Übergang bei angelegter Spannung in Durchlassrichtung ($U > 0V$). Es fließt ein Durchlassstrom. Dieser erzeugt einen ohmschen Spannungsabfall, welcher vernachlässigt werden darf.

- Zeichnen Sie das Energiebändermodell dieses pn-Übergangs nach Shockley in das vorbereitete Diagramm. Dicht bei den Kontakten ist der Halbleiter näherungsweise im Gleichgewicht. Wo möglich, geben Sie das Fermi-niveau an. Zeichnen Sie die angelegte Spannung U in das Diagramm ein.
(Skizze)
- Markieren Sie den Bereich der Raumladungszone und kennzeichnen Sie außerdem das Gebiet des p- und n-Halbleiters.
(Skizze)



_____ / 2.5 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 3.3)

Die Diffusionsspannung U_D ist einerseits mit der Raumladung verknüpft, andererseits hängt das Verhältnis der Ladungsträgerkonzentrationen der beiden Seiten eines pn-Übergangs mit U_D zusammen.

- Welche über die Shockley-Annahmen hinausgehende Vereinfachung muss zur Berechnung von U_D aus der vollständig ionisierten Dotierstoffraumladung gemacht werden? (Bekannt auch als "0. Shockley Bedingung")

(Annahme)

- Mit Hilfe welcher aus den Maxwellgleichungen abgeleiteten Differentialgleichung wird die Diffusionsspannung berechnet?

(Formel)

- Benennen Sie die mathematischen Operationen für die Lösung dieser vereinfachten Differentialgleichung (erinnern Sie sich an die grafische Veranschaulichung in der Vorlesung).

(Operationen benennen!)

- Schreiben Sie die Stromgleichung für den stromlosen Fall für n oder p auf. Zeigen Sie nun durch Integration der Gleichung über die Raumladungszone das Verhältnis der Ladungsträgerkonzentrationen von p (oder wahlweise n) an den beiden Rändern ($-w_p$) und (w_n) der Raumladungszone.

Hinweis: Es hat etwas mit der Diffusionsspannung zu tun, $D = \mu U_T$

(Formel, Rechnung)

Name: _____ Matrikelnummer: _____

_____ / 3 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 3.4)

Es soll die Diffusionsspannung U_D für einen bei Raumtemperatur betriebenen Silizium-pn-Übergang berechnet werden. Die Dotierungen sind: $N_A = 5 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3$; $N_D = 2 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3$

_____ / 1 Punkte

Name: _____

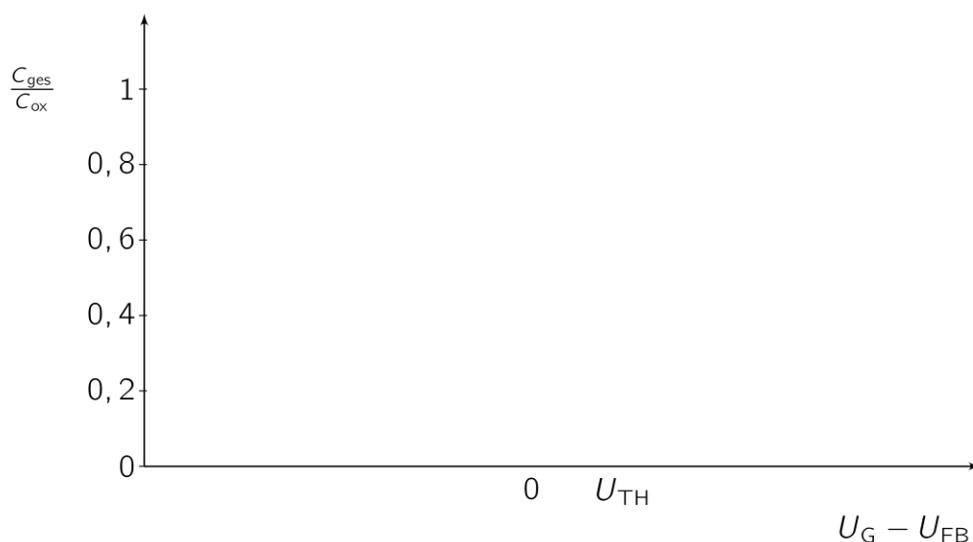
Matrikelnummer: _____

4 Bauelemente

15.5 Punkte

Aufgabe 4.1)

1. Zeichnen Sie den Verlauf der quasistatischen Kennlinie der Gesamtkapazität eines MOS-Varaktors über der korrigierten Gatespannung $U_G - U_{FB}$ (d.h., alle materialbedingten Verschiebungen auf der Spannungsachse sind eliminiert) in die vorgegebene Skizze.
2. Wo wird räumlich die Ladung in starker Inversion moduliert?
3. Warum entspricht in Akkumulation und starker Inversion die Kapazität der Gateoxidkapazität?
4. Geben Sie den Flachbandpunkt, die Punkte des Beginns schwacher Inversion und starker (klassischer) Inversion mit der zugehörigen Bandverbiegung Ψ an.
5. Ergänzen Sie nun den Verlauf der Kennlinie, unter der Bedingung, dass der Kleinsignalanteil der angelegten Spannung hochfrequent ist.
6. Wo wird bei hohen Frequenzen räumlich die Ladung in starker Inversion moduliert?
7. Wieso bleibt bei hohen Frequenzen die Kapazität in starker Inversion klein?
8. Nun betrachten Sie an Stelle eines MOS-Varaktors einen MOS-Transistor. Es ist ein Signal mit hochfrequentem Kleinsignal an das Gate angeschlossen. Womit müssen Source oder Drain oder beides verbunden werden, um einen quasistatischen Kurvenverlauf zu erhalten?



Name: _____ Matrikelnummer: _____

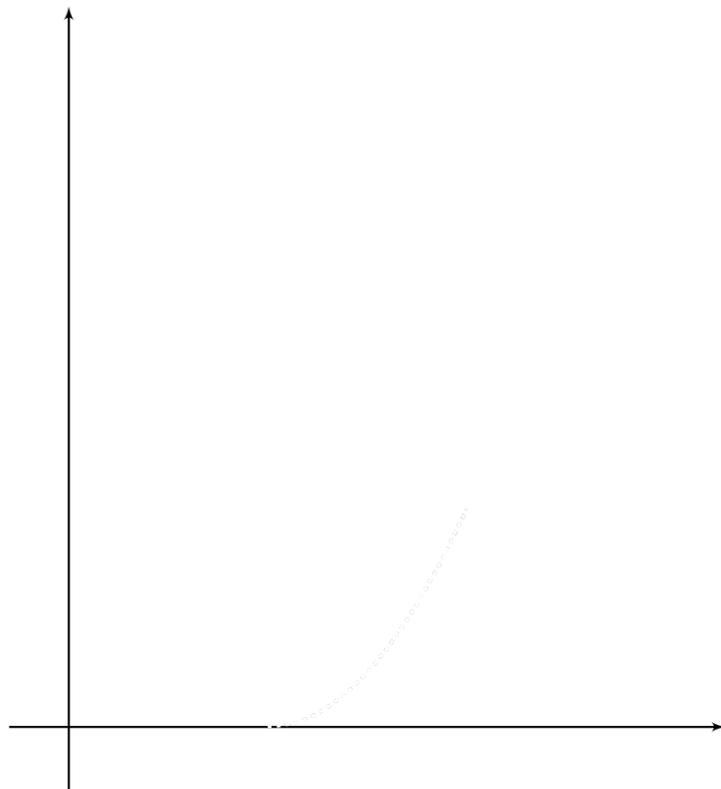
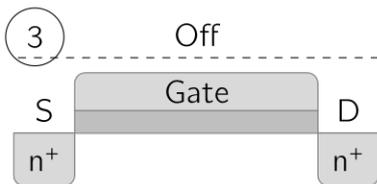
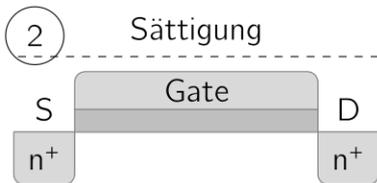
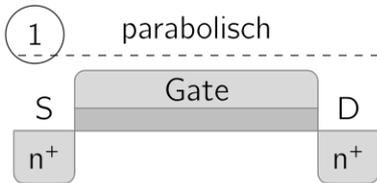
_____ / 6 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 4.2)

- Zeichnen Sie die Ausprägung des Inversionskanals in die vorbereiteten beschrifteten MOS-FET Strukturen ein.
(*Skizzen*)
- Zeichnen Sie in das leere Diagramm daneben eine dazugehörige Eingangs/Transfer-Kennlinie eines n-MOSFETs. Denken Sie an die Achsenbeschriftung.
(*Skizze, Beschriftung*)
- Markieren Sie in der Eingangs/Transfer-Kennlinie die von Ihnen in die MOS-Strukturen eingezeichneten Ausprägungen des Kanals. Nutzen Sie hierfür die vorgegebenen Nummern (1) bis (3).
(*Bereichsmarkierungen*)



Name: _____

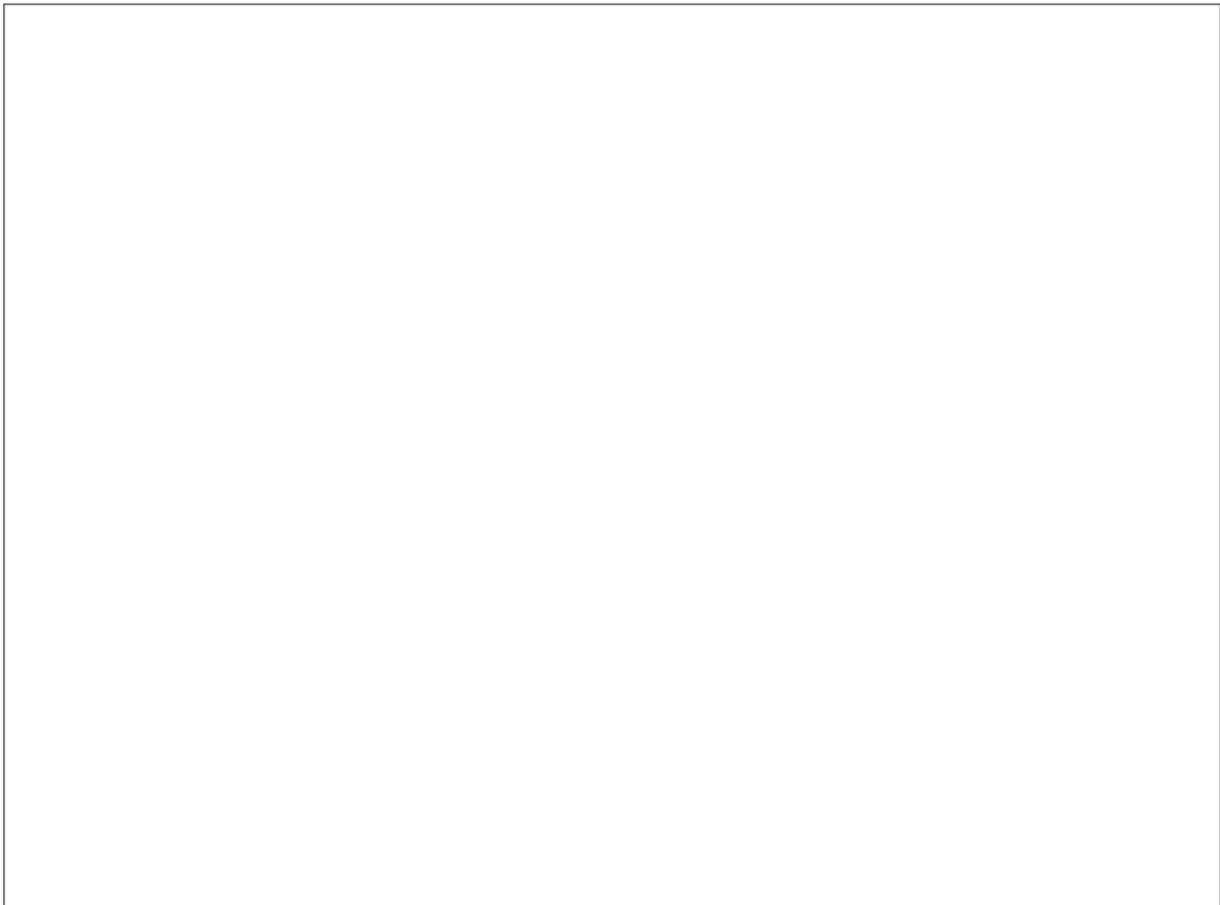
Matrikelnummer: _____

_____ / 4 Punkte

Aufgabe 4.3)

Skizzieren Sie schematisch den Aufbau eines in Planartechnologie hergestellten bipolaren pnp-Transistors. Benennen Sie die einzelnen Kontakte und die Dotierstofftypen (z.B. n^{++} , p^+ , usw). Zeichnen Sie alle Stromanteile durch das Bauelement ein. Wie teilt sich der Emitterstrom auf? Wie setzt sich der Basisstrom zusammen? Zeichnen Sie die beteiligten Ladungsträgertypen symbolisch in der Nähe des Raumladungszonenrandes mit Bewegungsrichtung ein.

(Skizze)



_____ / 5.5 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

5 Praktikumsfragen

8.5 Punkte

Aufgabe 5.1)

Nennen Sie die zwei grundsätzlichen Arten der Ladungsträgerrekombination in einem Halbleiter. Welche physikalischen Effekte hat der jeweilige Rekombinationsvorgang?

(2x Stichworte, je eine kurze Erklärung)

_____ / 2 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 5.2)

Skizzieren Sie qualitativ eine Kurvenschar der $I - U$ - Kennlinien einer Diode bei drei verschiedenen Temperaturen (z.B. 30°, 40°, 60° C). Es muss eine eindeutige Zuordnung der Temperaturen zu den Kurven zu erkennen sein. Skizzieren Sie die Kennlinien in linearer Darstellung nur im ersten Quadranten.

(Skizze, Beschriftung)



_____ / 1 Punkte

Aufgabe 5.3)

Beschreiben Sie kurz den Mechanismus in einer Lawinendiode. In welchem Betriebsbereich tritt dieser Effekt auf?

(Stichpunkte)

_____ / 1 Punkte

Name: _____

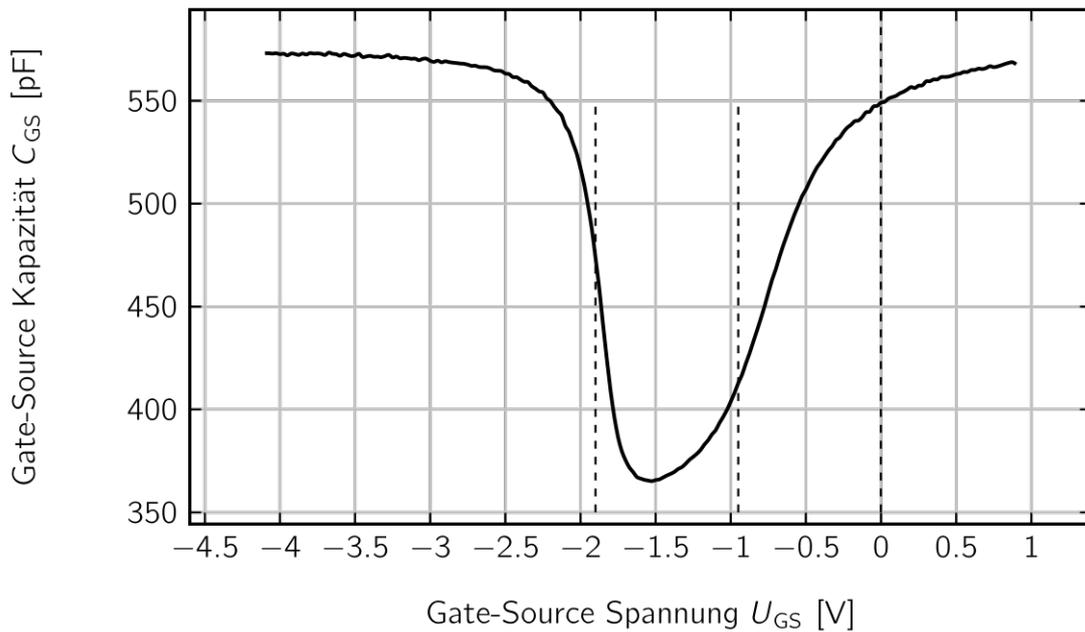
Matrikelnummer: _____

Aufgabe 5.4)

Im folgenden Diagramm ist die Kapazität eines MOS-Varaktors aus dem Praktikumsversuch zu sehen. Dabei wurde der Varaktor mit einem MOS-Transistor realisiert. Welches Substrat wurde vermessen, um diese Kennlinie zu erhalten?

Die Kapazität ist gegenüber der Gate-Source Spannung aufgetragen. Wo ist Source noch angeschlossen, damit die Varaktorkapazität vermessen wird?

Wie würde sich die Kennlinie ändern, wenn das Wechselsignal in der Messung hochfrequent ist? (Stichpunkt)



_____ / 2 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 5.5)

Zeichnen Sie die Eingangs-/Transferkennlinien eines n-Kanal-MOSFET für seine beiden Typen mit Beschriftung, geben Sie markante x-Werte für U_{GS} .

(*Skizze mit Beschriftung*)

_____ / 1 Punkte

Aufgabe 5.6)

Geben Sie einen Wert oder Bereich für die Spannungsverstärkung eines Bipolartransistors in Basisschaltung, Emitterschaltung und Kollektorschaltung.

(*Stichpunkte/Werte*)

_____ / 1 Punkte

Name: _____

Matrikelnummer: _____

Aufgabe 5.7)

Wie bestimmt sich die Minoritätsladungsträgerkonzentrationen am Rand der Raumladungszone in einem schwach beleuchteten, in Durchlassrichtung betriebenen pn-Übergang?

(*Stichpunkt oder Skizze*)

_____ / 0.5 Punkte

— Ende der Aufgaben —

Zusatzseite HLB Klausur II WS 2019/2020