

# Physik und Technologie der Halbleiterbauelemente:

## Aufgabe 1 (Technologie):

- 1.1) Geben Sie die Fickschen Gesetze an und leiten Sie daraus die eindimensionale Diffusionsgleichung her. Benennen Sie die Variablen.
- 1.2) Schreiben Sie die Diffusionsprofil für eine unerschöpfliche Quelle.
- 1.3) Wieso braucht man eine Nachbehandlung nach dem Ionenimplantation, und was beinhaltet diese Methode?
- 1.4) Stellen Sie die Verteilungskurve nach dem Ionenimplantation und wie diese aussehen würden für  $E_1 < E_2$ .
- 1.5) Nennen Sie die wichtigsten 2 Ursachen, wieso verwendet man Cu als Al?

## Aufgabe 2 (Physikalische Grundlagen):

- 2.1) Diffusion einer n-Wanne aus unerschöpflicher Quelle in ein p-Substrat. Zeichnen Sie die Dotierstoffkonzentration in Abhängigkeit von  $x$ . Markieren Sie die Tiefe des pn-Übergangs. Geben Sie die Formel für die Diffusion aus unerschöpflicher Quelle an. Wie sieht die Dotierstoffkonzentration zu einem späteren Zeitpunkt aus?
- 2.2) Geben Sie die Bilanz und Stromgleichung für die Löcher an.
- 2.3) In einem kontaklosen Halbleiter.  $T=300$ ,  $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Berechnen Sie  $n$  und  $p$ .  $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .
- 2.4) Vereinfachen Sie die Stromgleichung mit Hilfe der Gleichung für das Quasi-Fermi-Energieniveau.
- 2.5) Zeichnen Sie die Bändermodelle von  $W_{Fn}$  und  $W_{Fp}$  für den Fall schwache Injektion und hohe Injektion.

## Aufgabe 3 (pn-Übergang):

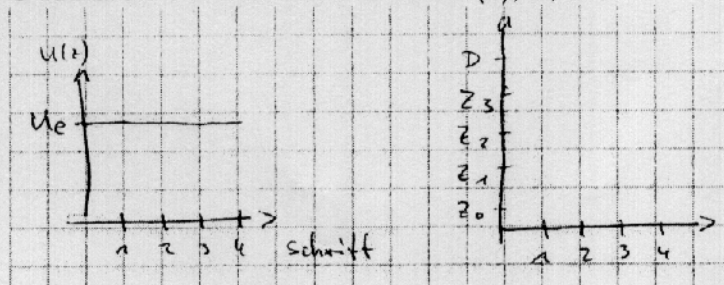
- 3.1) Nennen Sie die Voraussetzungen nach Shockley.
- 3.2) Zeichnen Sie die reale Diodenkennlinie in halblogarithmischer Darstellung. Nennen Sie die physikalischen Ursachen für die Abweichungen von der idealen Kennlinie und benennen Sie die Bereiche.
- 3.3) Geben Sie die Gleichung für den realen pn-Übergang an und zeichnen Sie das Ersatzschaltbild.
- 3.4) Geben Sie die Gleichung an, für die beiden Ströme.

## Aufgabe 4 (MOS-Varaktor):

- 4.1) pMOS Varaktor: Zeichnen Sie das Bändermodell für Akkumulation und starke Inversion. Zeichnen Sie darin die Bandverbiegung und das Volumenpotential ein. Wie groß ist die Bandverbiegung beim Übergang von schwacher zu starker Inversion?
- 4.2) Wie ist der Subthreshold-Bereich definiert?
- 4.3) Zeichnen Sie die Kennlinie für den Subthreshold-Bereich.
- 4.4) Warum kann es auch ohne angelegte Spannung zu einer Bandverbiegung kommen?

1.6.b) Bestimmen sie die maximale Abtastrate bei einem 4Bit ADC und einer Taktfrequenz von 1MHz

1.6.c) Skizzieren sie den Verlauf von  $U(z)$ ,  $Z$ ,  $D$



## 2 Physik und Technologie der Halbleiterbauelemente

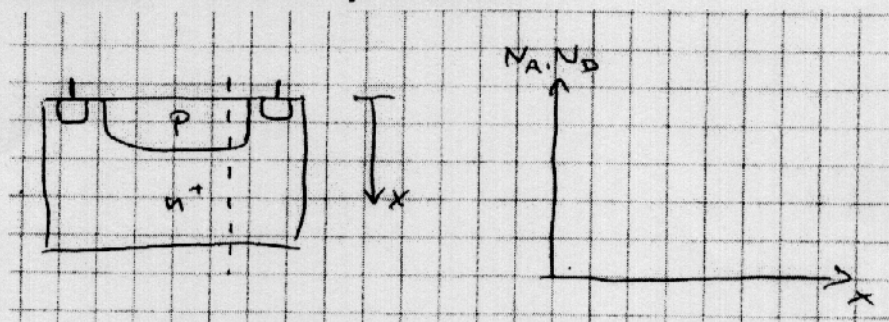
### 2.1 PN-Übergang

2.1.a) Nennen sie die 3 Voraussetzungen des Shockleyschen Modells der Diodenkennlinie

2.1.b) Zeichnen sie die reale Diodenkennlinie im Durchlassbereich

2.1.c) Nennen sie die physikalischen Ursachen für die Abweichung von der idealen Kennlinie und ordnen sie die Ursachen den einzelnen Bereichen der Kennlinie zu.

### 2.2 Diffusion / Ionenimplantation



2.2.a) Tragen sie die Dotierstoffkonzentration entlang der gestrichelten Linie in das Diagramm ein. (homogene Substratdotierung beachten)

2.2.b) Kennzeichnen sie die  $x_p$  Grenze der p-Wanne

2.2.c) Geben sie die Gleichung des zugehörigen Diffusionsprofils an.

2.2.d) Leiten sie aus den Fickschen Gesetzen die 1dimensionale Diffusionsgleichung her

- 2.2.e) Ein kontaktloser feldfreier Siliziumkristall sei homogen dotiert mit  $N_A=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Geben sie für  $T=300\text{K}$  die Löcher und Elektronenkonzentration an (es gelte bei  $T=300\text{K}$  für Si  $n_i=10^{10} \text{ cm}^{-3}$ )
- 2.2.f) Zeichnen sie das Störstellenprofil für 2 Energien  $E_2>E_1$  ( $G_{\text{opt}}=\text{const}$ )  
Kennzeichnen sie  $R_P$ ,  $N_P$ ,  $\Delta R_P$

### 3 Integrierte Schaltungen

- 3.1.a) Wie sind die Größen  $NM_L$  und  $NM_H$  definiert
- 3.1.b) Zeichnen sie das Bändermodell im n-Varaktor für Strong Inversion und Accumulation.  
Benennen sie  $\omega_B$ ,  $\omega_S$ ,  $\chi_S$   
Wie gross ist die Bandverbiegung beim Übergang von Weak zu Strong Inversion
- 3.1.c) Was bedeutet 'ratioed logic'?
- 3.1.d) Zeichnen sie das Ersatzschaltbild des NMOS! Inverters mit allen parasitären Kapazitäten.
- 3.1.e) Zeichnen Sie die Übertragungskennlinie eines N-MOS Inverters. Bemerken Sie die Punkte  $U_{IL}$ ,  $U_{IH}$ ,  $U_{OL}$ ,  $U_{OH}$  und geben Sie an in welchem Zustand sich die jeweiligen Transistoren befinden!
- 3.1.f) Diskutieren sie Vor- und Nachteile von CMOS und NMOS Technologie hinsichtlich der Störabstände, Bauteildimensionierung, Verlustleistung usw.
- 3.1.g) Zeichnen Sie ein XNOR in Passtransistorlogik!

Physik und Technologie der Halbleiterbauelemente

1. Zeichnen Sie einen PMOS-Transistor mit äußerer Beschaltung!
2. Gegeben sei ein MOS-Varaktor (Aluminium-Metallisierung, SiO, p-Si). Zeichnen Sie den Bandverlauf ab Grenzfläche SiO - p-Si bis ins neutrale Volumen hinein bei starker Inversion!  
Wie groß ist die Bandverbiegung beim Übergang schwache Inversion/starke Inversion?
3. Zeichnen Sie die halblogarithmische I(U)-Kennlinie einer PN-Diode im Subthreshold-Bereich!
4. Zeichnen Sie in die Kennlinie von 3. den Substratstrom ein und diskutieren Sie den Verlauf!
5. Welchen Einfluss haben sog. "heisse" Ladungsträger auf die Tresholdspannung?
6. Skizzieren Sie den halblogarithmischen Verlauf der I(U)-Kennlinie einer realen PN-Diode in Flussrichtung! Kennzeichnen Sie die verschiedenen Bereiche der Kennlinie und erklären Sie die physikalischen Gründe der Abweichung vom idealen Verhalten!
7. Wie muss die Shockley-Gleichung erweitert werden um ihre Gültigkeit auch bei kleinen Flusstströmen zu behalten?
8. Wie vereinfacht sich die Stromgleichung mit Benutzung der Quasiferminiveaus?
9. Nennen Sie Strom- und Bilanzgleichung der Elektronen!
10. Wie verändern sich Strom- und Bilanzgleichung bei einem feldfreien, homogen n-dotiertem Halbleiterkristall, bei dem eine oberflächennahe Generation stattfindet? Leiten Sie für diesen Fall die Diffusionsgleichung her!
11. Zeichnen Sie den Bandverlauf für oben gegebenen Fall!
12. Zeichnen Sie das ortsabhängige Ladungsträgerprofil für Ionenimplantation und kennzeichnen Sie Reichweite und Standardabweichung im Diagramm!
13. Wie sieht das Profil für höhere Implantationsenergie aus?
14. In ein homogen n-dotierten Halbleiterblock werde eine p-Well aus der Gasphase dotiert. Ein  $n^+$ -Gebiet werde anschliessend aus erschöpflicher Quelle eindiffundiert.  
Zeichnen Sie das ortsabhängige Ladungsträgerprofil im Querschnitt! Kennzeichnen Sie die Tiefe der beiden pn-Übergänge!
15. Wie sieht das Profil aus, wenn man länger dotiert?

# Physik und Technologie der Halbleiterbauelemente

Klausur zur Übung vom 14.02.2007

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN  
FAKULTÄT FÜR  
INGENIEURWISSENSCHAFTEN

## Aufgabe 1 (Technologie)

- 1.1 Geben Sie die Fickschen Gesetze an und leiten Sie daraus die eindimensionale Diffusionsgleichung her. Benennen Sie alle Variablen.
- 1.2 Nennen Sie die zwei wichtigsten Vorteile von Kupfer gegenüber Aluminium bei der Metallisierung.
- 1.3 Zeichnen Sie  $N(x)$  für  $E_2 > E_1$ . Kennzeichnen Sie  $R_p$  und  $\Delta R_p$ .
- 1.4 Zeichnen Sie das Diffusionsprofil für eine erschöpfliche Quelle für  $t_2 > t_1$ . Kennzeichnen Sie  $x_n$ . Geben Sie  $N(x,t)$  an.

## Aufgabe 2 (Physikalische Grundlagen)

- 2.1 Zeichnen Sie das Bändermodell mit den Quasi-Ferminiveaus  $W_{Fn}$ ,  $W_{Fp}$  für den Fall der starken/schwachen Injektion.
- 2.2 Geben Sie die Strom- und Bilanzgleichung für Löcher an.
- 2.3 Wie ändern sich Strom- und Bilanzgleichung für einen kontaktlosen, feldfreien Halbleiter?
- 2.4 Geben Sie  $\Delta n$ ,  $\Delta p$  für den Fall der schwachen Injektion an.
- 2.5 Der Halbleiterkristall sei mit  $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  dotiert. Geben Sie  $p$  und  $n$  für  $T = 300 \text{ K}$  an ( $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ).

## Aufgabe 3 (Kennlinien)

- 3.1 Geben Sie die Stromdichte-Spannungskennlinie  $j(U)$  für einen Schottky-Kontakt und für einen Kontakt mit ohmschem Verhalten an.
- 3.2 Stellen Sie die  $I(U)$ -Kennlinie für einen realen pn-Übergang in Flussrichtung in halblogarithmischer Darstellung dar und markieren Sie die drei wichtigen Bereiche. Nennen Sie die physikalischen Ursachen, die eine Abweichung dieser Kennlinie von der idealen Diode bewirken.
- 3.3 Zeichnen Sie ein ESB, das den Nichtidealitäten einer realen Diode für alle Strombereiche Rechnung trägt. Geben Sie die reale Kennliniengleichung an.

## Aufgabe 4 (MOS-Transistor)

- 4.1 Zeichnen Sie für einen MOS-Varaktor das Energiebändermodell von der Oberfläche eines n-Substrates bis in das neutrale Volumen für den Fall der starken Inversion. Markieren Sie  $\phi_B$  und  $\psi_S$ . Kennzeichnen Sie den Midgap-Punkt. Wie groß ist die Bandverbiegung beim Übergang von schwacher zu starker Inversion?
- 4.2 Auch bei einem spannungsfreien MOS-Varaktor kommt es zu einer Bandverbiegung. Erläutern Sie, wodurch diese zustande kommt.
- 4.3 Was versteht man unter einem Subthreshold-Bereich? Wie ist  $U_{th}$  definiert?
- 4.4 Wie wirken sich „heiße Ladungsträger“ auf die Thresholdspannung aus?

# Physik und Technologie der Halbleiterbauelemente

## 1. Mos\_Transistor

1.1 Zeichnen Sie einen n-MOSFET vom Anreicherungstyp und seine Beschaltung.

1.2

Ein MOS-Varaktor bestehe aus der Schichtenfolge Aluminium, Siliziumdioxid und n-Substrat. Zeichnen Sie das Energiebändermodell von der Oberfläche eines n-Substrates bis in das neutrale Volumen für den Fall der starken Inversion.

Markieren Sie das Volumenpotential  $\phi_B$  und die Bandverbiegung  $\Psi_s$ . Kennzeichnen Sie den Midgap-Punkt. Wie groß ist die Bandverbiegung beim Übergang von schwacher zu starker Inversion? (2 Punkte)

1.3 Was versteht man unter Subthreshold-Bereich? Wie ist die Threshold-Spannung definiert?

1.4

Stellen Sie die Eingangsgangskennlinien für den Subthreshold-Bereich dar.

1.5 Wie wirken sich „heiße Ladungsträger“ auf die Thresholdspannung auf.

## 2. Kennlinien

2.1 a) Stellen Sie die  $I(U)$ -Kennlinie für einen realen pn-Übergang in Flussrichtung in halblogarithmischer Darstellung dar und markieren Sie die drei wichtigen Bereiche. Nennen Sie die physikalischen Ursachen, die eine Abweichung dieser Kennlinie von der idealen Diode nach dem Shockley-Modell bewirken.

b) Wie muss die Diodengleichung nach Shockley ergänzt werden, damit sie nicht nur bei mittleren Strömen, sondern auch bei kleinen Strömen die reale Diode korrekt beschreibt?

2.2 Zeichnen Sie die Stromdichte-Spannungskennlinien  $j(U)$  von zwei unterschiedlichen Metall/Halbleiterkontakten: einem gleichrichtenden Schottky-Kontakt und einem Kontakt mit ohmschen Verhalten.

2.3

Wie wirken sich „heiße Ladungsträger“ auf die Thresholdspannung auf.

## 3. Physikalische Grundlagen

3.1 In einem homogen p-dotierten, kontaktlosen, feldfreien Halbleiterkristall werden mit einer homogenen, stationären optischen Generationsrate  $G$  Elektron-Lochpaare generiert. Wie vereinfachen sich unter diesen Bedingungen die Stromgleichung und Bilanzgleichung? Welche stationäre Überschussladungsträgerkonzentration  $dn$ ,  $dp$  stellt sich bei schwacher Injektion ein?

### 3.3

Es gelten die Bedingungen, wie unter 2.2 geschildert. Jedoch werde nun die Einstrahlung so verändert, dass die Generation von Ladungsträgern zwar noch stationär aber nur oberflächennah stattfindet und in das Volumen hinein abklingt. Was folgt in diesem Fall für Stromgleichung und Bilanzgleichung z. B. der Löcher?

Leiten Sie daraus die stationäre Diffusionsgleichung für die Löcher her.  
Zeichnen Sie qualitativ den Verlauf des Energiebänderdiagramms für die vorliegende Situation unter Berücksichtigung der Quasi-Ferminiveaus ( $W_{Fn}, W_{Fp}$ )!  
(Anmerkung: Zur Vereinfachung können gleiche Ladungsträgerbeweglichkeiten vorausgesetzt werden.)

## 4. Technologie

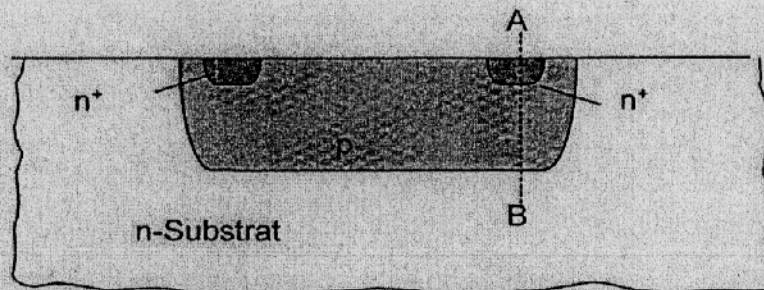
### 4.1

Um einen Halbleiter zu dotieren, wird z. B. das Diffusionsverfahren eingesetzt.

- a) Die Diffusion lässt sich über die Fickschen Gesetze beschreiben. Leiten Sie aus diesen die Diffusionsgleichung für den eindimensionalen Fall her! Benennen Sie die verwendeten Größen.

### 4.2

Zur Herstellung eines n-Kanal-MOS-Transistors wurden in ein homogen dotiertes n-Substrat eine p-Wanne (Well) und zwei  $n^+$ -Bereiche eindiffundiert.



Die p-Wannendiffusion mit Bor-Atomen wurde aus der Gasphase heraus durchgeführt. Die  $n^+$ -Source- und  $n^+$ -Drain-Gebiete wurden aus einer dünnen Oberflächenbelegung heraus mit Phosphor-Atomen diffundiert.

- a) Tragen Sie **qualitativ** entlang eines Längsschnittes durch das Bauelement, wie durch die gestrichelte Linie AB in der Skizze angedeutet, die Dotierstoffkonzentration auf (von der Halbleiteroberfläche bis in das Substrat). Berücksichtigen Sie dabei die  $n^+$ -Diffusionen, die p-Wannen-Diffusion und die homogene Substratdotierung ( $N_A, N_D, N_{Sub}$ ).

Kennzeichnen Sie die Wannentiefe  $x_{n^+}$  der  $n^+$ -Gebiete und die Tiefe  $x_p$  der p-Wanne. Geben Sie an, wie die Dotierungsprofile zu einem späteren Zeitpunkt des Diffusionsvorgangs  $t_2 > t_1$  aussehen würden.

# Klausurprotokoll

Physik und Technologie der Halbleiterbauelemente, 21.2.2008

## 1 Technologie

1. Nennen Sie die Fick'schen Gesetze.
2. Leiten Sie aus den Fick'schen Gesetzen die eindimensionale Diffusionsgleichung her.
3. Warum haben Überschussladungsträger im Galliumarsenid eine längere Lebensdauer als in reinem Silizium?

## 2 Physikalische Grundlagen

Gegeben sei ein p-dotierter Si-Halbleiter mit  $N_A = 10^{15} \text{cm}^{-3}$  und  $n_i = 10^{10} \text{cm}^{-3}$ . Der Halbleiter sei feldfrei, gleichzeitig werden gleichverteilt im Halbleiter optisch Elektronen-Loch-Paare generiert.

1. Nennen Sie die allgemeinen Strom- und Bilanzgleichungen für Elektronen und Löcher.
2. Wie vereinfachen sich die Strom- und Bilanzgleichungen für den oben beschriebenen Fall?
3. Nun werde die optische Generation zum Zeitpunkt  $t = 0$  beendet. Leiten Sie aus der obigen Gleichung die Abklingfunktion für die Minoritätsladungsträger her. Wie lautet die Randbedingung für  $t = 0$ ?

## 3 pn-Übergang

1. Skizzieren Sie die reale Kennlinie eines pn-Übergangs im Durchlassbereich in halblogarithmischem Maßstab.
2. Nennen Sie die drei Voraussetzungen für das Shockley-Modell.
3. Kennzeichnen Sie in der Skizze die Abweichungen von der idealen Kennlinie und erklären Sie deren physikalische Ursachen.
4. Geben Sie die reale Diodengleichung an und zeichnen Sie das dazugehörige Ersatzschaltbild. Benennen Sie dabei alle Elemente.

## 4 MOS-Übergang

1. Welche Kapazitäten treten im Ersatzschaltbild eines MOS-Transistors auf und was ist ihre physikalische Bedeutung?
2. Skizzieren Sie das Bändermodell eines pMOS-Varaktors von der Oxidschicht bis ins neutrale Volumen für Akkumulation und starke Inversion.
3. Kennzeichnen sie in der Skizze den Midgap-Punkt und geben Sie die Bedingung für starke Inversion an.
4. Wie ist der Subthreshold-Bereich definiert und was ist  $U_{Th}$ ?



## Blockklausur Mikroelektronik vom 18.04.2008

### Physik und Technologie der Hlb

1. Geben sie die Fickschen Gesetze an und leiten sie daraus die eindimensionale Diffusionsgleichung her. Benennen Sie alle Variablen.
2. P-Mos Varaktor (auch N-Mos Varaktor angucken) Bänderdiagramm Zeichnen, Midgappunkt, Übergang zu starke Inversion nennen, wie groß ist die Bandverbiegung.
3. Strom und Bilanzgleichung für Löcher nennen .
4. Wie verändern sich Strom- und Bilanzgleichung bei einem Feldfreien, homogen n-dotiertem Halbleiterkristall, bei dem eine Oberflächennahe Generation stattfindet? Leiten Sie für diesen Fall die Diffusionsgleichung her!
5. Stellen Sie die  $I(U)$ -Kennlinie für einen real pn-Übergang in Flussrichtung in halb-logarithmischer Darstellung dar und markieren sie die drei wichtigen Bereiche! Von der idealen nach dem Schokley-Modell bewirken!
6. Nennen sie die wichtige Ursachen der Entstehung der drei Bereiche in Aufgabe 5.