

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} ?

April 2007
1. April 2007
Straße des 17. Juni 130-132

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 ϕ_B und die Bandverbiegung Ψ_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

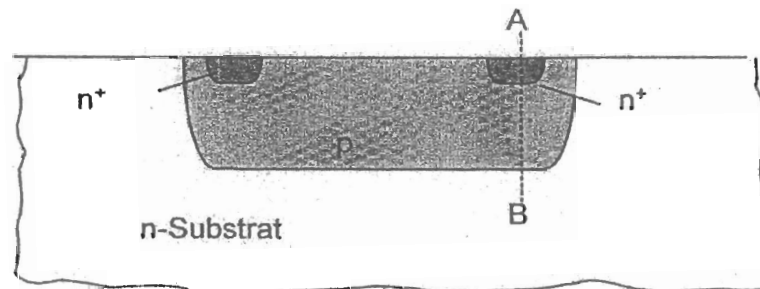
4.1

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.

Physik und Technologie der Halbleiterbauelemente

Klausur zur Übung vom 14.02.2007

Physik und Technologie der Halbleiterbauelemente
Klausur zur Übung vom 14.02.2007

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 ΔR_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 kotaktlosen, feldfreien Halbleiter?
- 2.4 Geben Sie Δn , Δp für den Fall der schwachen Injektion an.
- 2.5 Der Halbleiterkristall sei mit $N_A \approx 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ dotiert. Geben Sie p und n für $T=300 \text{ K}$ an ($n_i \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$).

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 ϕ_B und ψ_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?

20.10.2006

Integrierte Schaltungen

1. CMOS Inverter Kleinsignalersatzschaltbild zeichnen, Übertragungsfunktion $H(s)$ berechnen und die Übertragungsfunktion zeichnen. Welcher Transistor in welchem Bereich sich befindet angeben.
2. Transistorwerte wurden gegeben U_{gs} , U_{ds} , U_t , usw. Man sollte erkennen in welchem Bereich ist der Transistor. Steilheit für beide Fälle berechnen und r_o , intrinsische Verstärkung der beiden Bereiche vergleichen
3. Passtransistor = Transfertransistor Logik Nachteile erklären und die Lösung nennen wie man die beheben kann

Halbleiter Bauelemente

1. Strom und Bilanzgleichung für Löcher nennen
2. Reale Diodenkennlinie zeichnen und Bereiche erklären
3. Wie kann man die Ideale Diodengleichung erweitern damit sie auch für schwache Ströme gilt
4. P-MOS-Varaktor Bänderdiagramm Zeichnen, Midgappunkt, Übergang zu starke Inversion nennen, Wie groß ist die Bandverbiegung
5. Halblogarithmische Darstellung von I_d bei konstantem U_{ds} zeichnen (Transistor)
6. Ortsabhängigen Ladungsprofil im Querschnitt. Die tiefe der beiden pn-Übergänge einzeichnen. (Achtung: Aufpassen aus welcher Quelle die einzelnen Bereiche eindiffundiert wurden: erschöpfliche oder unerschöpfliche Quelle), Wie sieht es aus wenn man länger dotiert
7. N-HL mit Oberflächengeneration. Strom und Bilanzgleichung für Elektronen. Bänderdiagramm.
8. Wie lassen sich die Stromgleichungen mit Hilfe von Quasiferminiveaus vereinfachen
9. (+)---Al---SiO₂---pSubstanz---Substrat Kontakt---(-) Varaktor ist gegeben. Ladungsträgerdichte, Feld und Potential zeichnen. Formeln für die drei nennen
10. Warum kommt es zu Bandverbiegung auch wenn keine Spannung anliegt

AdEle

1. Schmitttrigger erkennen, Schaltschwellen berechnen
2. Daisy-Chain und Skip-Chain erklären. Wozu braucht man das
3. Open Collector und Tristate Busankopplung erklären
4. AD Umsetzer Dual Slope erklären
5. Universalfilter

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?

Integrierte Schaltungen

1. Zeichnen Sie die Kennlinie $I_{DS}(U_{GS})$ eines NMOS-Transistors für $U_{DS} = U_{TH}$! Kennzeichnen Sie folgende Bereiche: Subthreshold-Bereich, Triodenbereich und Sättigungsbereich!
2. Zeichnen Sie die Kennlinie $I_{DS}(U_{DS})$ und kennzeichnen Sie Trioden- und Sättigungsbereich!
Wie lauten die Kennliniengleichungen der beiden Bereiche?
3. Vergleichen Sie Trioden- und Sättigungsbereich im Hinblick auf erzielbare Verstärkung!
4. Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild eines NMOS-Transistors unter Einbeziehung sämtlicher Kapazitäten!
5. Zeichnen Sie: Skript S.25, Bild 2.2.11. Spannungsabhängigkeiten innerer Kapazitäten!
6. Zeichnen Sie einen NMOS-Inverter mit passiver Last und dessen Kennlinie! Welcher Ausgangspegel sollte bei $U_{IN} = U_{DD}$ erreicht werden?
7. Skizzieren Sie das Kleinsignalersatzschaltbild und berechnen Sie die Übertragungsfunktion!
8. Zeichnen Sie einen CMOS-Inverter und nennen Sie 3 Vorteile gegenüber einem NMOS-Inverter!
9. Welche Ausgangsspannung U_{OUT} ergibt sich bei folgender Passtransistor-Schaltung für die Fälle $U_{IN} = 0$ und $U_{IN} = U_{DD}$?

