



TU Berlin Fakultät IV
Fachgebiet Halbleiterbauelemente
Praktikum Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik

Praktikum Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik

Dirk Barbendererde (321 836)

Thomas Kapa ()

Alona Siebert ()

Özgü Dogan (326 048)

13. September 2012

Gruppe 1

Betreuer:

Clemens Helfmeier

Philipp Scholz

Inhaltsverzeichnis

1 Kennlinie	1
1.1 Messaufbau	1
1.2 Auswahl der zu messenden Diode	1
1.3 Erwartete Kennlinie	1
2 Schaltverhalten	3
3 Emissionsmessung	3
3.1 Direkter und indirekter Halbleiter	3
3.1.1 direkter Halbleiter	3
3.1.2 indirekter Halbleiter	4
3.2 Rekombinationsmechanismen	4
3.2.1 strahlende Rekombination	4
3.2.2 nichtstrahlende Rekombination	5
3.3 Messaufbau	6
3.4 Messergebnisse	7
3.5 Auswertung	9

1 Kennlinie

1.1 Messaufbau

Die erste Untersuchung die wir unseren Dioden unterzogen haben war die Aufnahme der Kennlinien. Dazu muss der pn-Übergang unter einem Lichtmikroskop kontaktiert werden. Die beiden Gebiete werden jeweils mit einem Kanal des Parameter-Analyzer 4145A von HP verbunden, der einen sweep der Spannung von -1 V bis 1 V macht und dabei den Strom misst.

Diese Messung haben wir auf verschiedenen Dies durchgeführt um diese miteinander vergleichen zu können.

1.2 Auswahl der zu messenden Diode

Um möglichst aussagekräftige Messwerte zu bekommen haben wir uns dazu entschieden jeweils die größte Diode auf den Dies für unsere Messungen zu benutzen. Davon haben wir uns versprochen, dass sowohl Durchlass- als auch Sperrstrom am größten sind und somit besser zu messen sein würden als bei kleineren Dioden. Nach der Auswertung anderer Messungen und **TODO**:

einigen weiteren Überlegungen

stellte sich aber heraus, dass dies ein Trugschluss war. Eine Größere quadratische Diode führt zwar sehr wohl einen höheren Strom als eine kleinere Quadratische, bei Durchlass- und Sperrstrom kommt es aber nicht auf die Größe sondern auf die pn-Übergangs-Fläche an. Daher kann eine der Fläche nach nur halb so große Diode, mit verzahnter Fingerstruktur, noch mehr Strom führen als die flächenmäßig größte Diode für die wir uns entschieden haben. Deshalb wird am Ende der Auswertung zusätzlich noch eine solche fingerstruktur betrachtet.

1.3 Erwartete Kennlinie

Bei intakten Dioden erwarten wir im Grunde eine Kennlinie nach der Formel von Shockley:

$$J_{ges} = J_0 \cdot (e^{\frac{u}{U_t}} - 1) \quad (1)$$

jedoch inklusive realitätsbedingte Abweichungen.

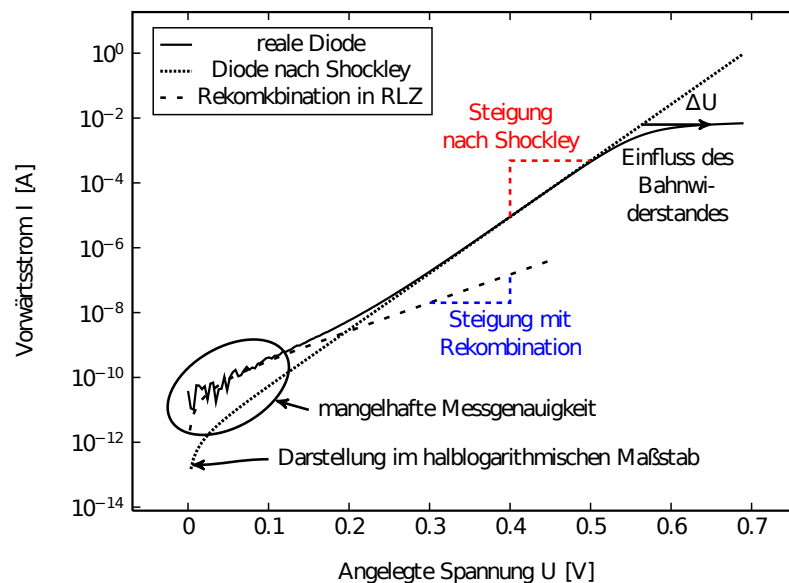


Abb. 1: Reale kennlinie einer Diode

Wie in Abb. 1 logatythmisch dargestellt erwarten wir, dass nur der mittlere Teil zwischen 0,2 V und 0,5 V der Shockley-Gleichung folgt. Bei höheren Spannungen ist der Widerstand der Bahngebiete nicht mehr vernachlässigbar klein und wird sich deutlich mtrommindernd auf die Kennlinie auswirken. Außerdem wird sich durch die nichteinhaltung der Shockleybedingungen die Rekombination in der Raumladungszone bemerkbar machen. Bei kleinen Spannungen (unter ca. 0,2 V) fließt deutlich mehr Strom aufgrund von Rekombination als durch den Potentialunterschied, wodurch der mehr Strom fließt als nach Gl. 1.

Die in Abb. 1 dargestellte mangelhafte Messgenauigkeit haben wir nicht erwartet. Wir sind davon ausgegangen, dass selbst bei sehr guten Dioden, also in diesem Fall welchen mit sehr kleinen Sperrströmen, der Parameter-Analyzer keine Probleme hat diese zu messen.

Außerdem werden wir den Strom betragsmäßig über der Spannung auftragen, was es ermöglicht zur illustration auch negative Ströme logarythmisch dar zu stellen. In unserer Auswertung sind Ströme bei negativen Spannungen also als negative Ströme auf zu fassen.

1.4 Messergebnisse

1.5 Auswertung

Quellen: kennlinie: Laborskript Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik (Aydin Asri, Arminius Kuckelt, Michael Sadowski, Julian Utehs und Tristan Visentin) S.66

erst

Benennung der Dateien:

Kennlinie_Wav_{er}nummer_{Die}[Zeile, Spalte]_{Mess}messung.mat

100 µA Strombegrenzung

Welche Diode? Welcher Manipulator

SMU1 = GND SMU2 = GND SMU3 = Var1

Unterdiffusion

unterspannung 0.0 2.4 0.5 3.8 0.8 4.5 1.0 5.0 1.3 5.5 1.8 6.7 2.5 8.2 3.0 9.2

was wir messen (querschnitt) was für ne Kennlinie wir erwarten

änderung der Kennlinie mit beleuchtung messung mit beleuchtung gegen messung unbeleuchtet

verschiedene messungen auf dem wafer unterchiede?

sperrverhalten

2 Schaltverhalten

3 Emissionsmessung

Eine Emissionsmessung ist in der Halbleitertechnologie insofern interessant, weil sie Erkenntnisse über charakteristische Eigenschaften des Halbleiters, in unserem Fall die selbst hergestellte Diode, liefert. Dazu gehören die Ladungsträgerlebensdauer $\tau_{n,p}$ und die Diffusionslänge $L_{n,p}$. Auf die Lebensdauer lässt sich mithilfe der Diffusionslänge und des Diffusionskoeffizienten schließen. Dieser ist ein materialabhängiger Wert, welcher von uns nicht weiter beachtet wird. Der folgende Zusammenhang hilft bei der Berechnung von $\tau_{n,p}$:

$$L_{n,p} = \sqrt{\tau_{n,p} \cdot D_{n,p}}$$

Ziel unserer Messung aber war die Bestimmung der Diffusionslänge in unserer Diode. Dieser wurde über die realisierte Intensitätsmessung anhand der Emissionen in der Diode ermittelt. Dabei wurden folgende Proportionalitätsverhältnisse verwendet:

$$I(x) \sim \Delta n \sim \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)$$

Hierbei werden Strahlungsintensität ins Verhältnis mit der Minoritätsüberschussladungsträgerkonzentration und dieser wiederum ins Verhältnis mit einem Exponentialterm gesetzt. Daher kann man die Intensitätsmessung direkt mit diesem Term in Verbindung setzen, welcher in seinem Argument die gesuchte Diffusionslänge beinhaltet. Weiteres zur Berechnung des L_n steht in der Auswertung der Messung.

Um aber die Intensitätsmessung verstehen zu können müssen einige grundlegende Theorien der Halbleiter bezüglich ihrer Typen und ihrer Rekombinationsarten behandelt und nachvollzogen werden.

Daher gibt es vor der Versuchsdurchführung und der Auswertung zunächst eine kleine Exkursion in den theoretischen Bereich.

3.1 Direkter und indirekter Halbleiter

Es gibt zwei Arten von Halbleitern, die direkten und die indirekten Halbleiter. Diese unterscheiden sich darin, dass die Rekombination eines Ladungsträgers aus dem Leitungs- in das Valenzband unterschiedliche Voraussetzungen erfordert.

3.1.1 direkter Halbleiter

Die Rekombination bei einem direkten Halbleiter ist relativ simpel. Ein freies Elektron braucht dabei nur, unter Abgabe der jeweiligen Energie, den Bandabstand zwischen Leitungs- und Valenzband zu überqueren.



./Emissionsbilder/restliches/direkt.png

Abb. 2: Rekombination bei einem direkten Halbleiter

3.1.2 indirekter Halbleiter

Die Rekombination bei einem indirekten Halbleiter erfordert neben einem Energieunterschied auch einen Impulsunterschied, damit das Elektron auf dem Valenzband auftreffen kann. Dieser Impulsunterschied ist in der folgenden Abbildung zu erkennen.



./Emissionsbilder/restliches/indirekt.png

Abb. 3: Rekombination bei einem indirekten Halbleiter

TODO:

Bildquellen, TBH-Skript S.92 einfügen

Ein weiterer Unterschied zwischen direkten und indirekten Halbleitern ist der, dass direkte Halbleiter hauptsächlich strahlend rekombinieren, wohingegen indirekte Halbleiter stochastisch betrachtet fast nur nichtstrahlend rekombinieren. Dennoch findet mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit auch vereinzelt strahlende Rekombination in den indirekten Halbleitern statt.

Bevor weiter darauf eingegangen wird, in wie fern dies für die Emissionsmessung von Bedeutung ist, werden die Rekombinationsarten, strahlend und nichtstrahlend, wiederholt.

3.2 Rekombinationsmechanismen

Eine Rekombination erfolgt stets unter Abgabe von einer Energiedifferenz. Dabei wird unterschieden, ob diese Energie in Form eines Lichtquants oder von Wärme abgegeben wird, wodurch auch die Beschreibung strahlend oder nichtstrahlend

entsteht.
Nun folgen je ein Beispiel für diese Mechanismen.

3.2.1 strahlende Rekombination

Die strahlende Rekombination, hauptsächlich bei direkten Halbleitern zu sehen, besagt, dass der rekombinierende Ladungsträger die Energiedifferenz, welche er zurücklegt, in Form eines Photons freigibt. Die Energie dieses Photons beträgt genau die Energie des Bandabstands zwischen den beiden Bändern. Anders ausgedrückt kann man sie auch Rekombinationsenergie nennen:

$$W_{\text{Rek}} = h \cdot \nu$$

Diese Rekombinationsenergie setzt sich aus dem Produkt aus dem Planckschen Wirkungsquantum h und die Frequenz des entstehenden Lichts ν .

Ein Beispiel für die strahlende Rekombination ist die Band-Band-Rekombination, welche in der folgenden Abbildung dargestellt wurde:



./Emissionsbilder/restliches/bandband.png

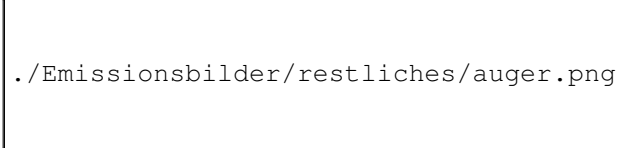
Abb. 4: strahlende Band-Band-Rekombination

Man erkennt ein Elektron, welches beim Rekombinieren, die bereits erwähnte Rekombinationsenergie in Form eines Photons abgibt. Es kann aber auch vorkommen, dass die abgegebene Energie an ein weiteres Elektron im Leitungsband abgegeben wird, wodurch dieser auf ein höheres Energieniveau im Leitungsband angehoben und wieder runterfallen kann. Diese Möglichkeit ist bei der strahlenden Rekombination die unwahrscheinlichere Variante.

3.2.2 nichtstrahlende Rekombination

Die nichtstrahlende Rekombination findet hauptsächlich bei indirekten Halbleitern statt. Dabei wird die Rekombinationsenergie an ein weiteres Elektron im Leitungsband abgegeben, welches auf ein höheres Energieniveau angehoben wird und unter Abgabe von thermischer Energie wieder runterfallen kann.

Als ein Beispiel für die nichtstrahlende Rekombination wird die Augerrekombination dargestellt:



./Emissionsbilder/restliches/auger.png

Abb. 5: nichtstrahlende Auger-Rekombination

TODO:

Bildquellen einfügen: TBH-Skript S.93,94

Die für die Emissionsmessung verwendete Diode besteht aus Silizium, welcher ein indirekter Halbleiter ist und dessen Rekombinationen hauptsächlich nichtstrahlend sind. Wie aber schon bei den Halbleitertypen erwähnt, kann es bei indirekten Halbleitern auch mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit zu strahlender Rekombination kommen. Da die Abgabe von thermischer Energie zu einem Temperaturunterschied in der Diode führen würde, bräuchte man bei der Emissionsmessung sehr feine und genau Thermometer, welche im μm -Bereich nicht realisierbar sind. Daher wird die stochastisch in geringer Menge vorhandene strahlende Rekombination betrachtet um über die mit lichtempfindlichen Kameras gemessene Lichtintensitäten auf die gesuchte Diffusionslänge schließen zu können.

Emission entsteht bei der Rekombination eines freien Ladungsträgers, welches nur in Durchlassrichtung bei einer Diode erwartet wird. Dabei werden die Majoritäten ins entgegengesetzte Gebiet injiziert und rekombinieren dort als Minoritäten mit den oppositär gepolten Ladungsträgern. Die dabei freigesetzte Energie kann dann als Emission wahrgenommen werden. Emission kann aber auch in Sperrrichtung entstehen. Die sogenannte Feldemission findet dabei ausschließlich in der ausgebreiteten Raumladungszone statt. Sobald eine Sperrspannung an der Diode angelegt wird, werden die freien Ladungsträger aus der Raumladungszone gesaugt und erfahren dabei eine kinetische Energie, dessen Stärke von der Größe der Sperrspannung abhängt. Während der beschleunigten Bewegung der Ladungsträger aus der Raumladungszone, können diese mit Gitteratomen zusammenprallen und Elektronen aus diesem Atom auf ein höheres Energieniveau anheben. Wie bei der nichtstrahlenden Rekombination entsteht bei diesem Vorfall hauptsächlich thermische Energie, es kann aber auch, mit einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit eine strahlende Rekombination vorkommen.

Die Feldemission ist im Vergleich zu der Emission in Flussrichtung unbedeutend klein. Daher ist für die Intensitätsmessung nur eine Emission in Flussrichtung relevant.

3.3 Messaufbau

Die Emissionsmessung erfolgt, wie in der Einleitung erwähnt, durch eine Intensitätsmessung während der Rekombinationen in Flussrichtung der Diode. Die Messung wird mithilfe des Phemos 1000 durchgeführt, welches ein Prüfgerät in der Halbleitertechnik ist und hauptsächlich für Fehlerdetektion dient. Um diese geringe Lichtintensität messen zu können, braucht man eine lichtempfindliche CCD Kamera. Diese ist im Phemos integriert und muss während der gesamten Messung auf -50°C gekühlt werden. So werden thermische Rauscheinflüsse der sehr empfindlichen Kamera vermieden um das Ergebnis nicht zu verfälschen.

Der Wafer, mit mehreren Diodenstrukturen, wird in dem Innenraum des Phemos auf einer Vakuumplatte fixiert, sodass der erwünschte Bereich des Wafers mit dem passenden Objektiv vergrößert werden kann. Diese Vergrößerung hilft bei der Kontaktierung des p- und des n-Pads der Diode anhand Nadelspitzen, welche in der unteren Abbildung im Licht des Mikroskops zu erkennen sind.

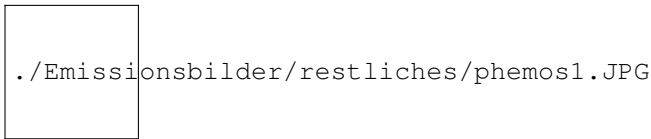


Abb. 6: Innenraum des Phemos

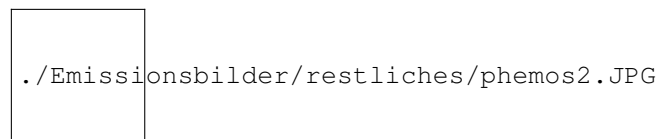


Abb. 7: kontaktierte Diode auf dem Wafer

Anhand eines Live-Bilds der CCD Kamera, kann man bis zum Start der Messung den fokussierten Bereich bepannungsquelle für den Durchlassbetrieb der Diode wurde der HP4145A, ein sensibiles Analysegerät für Halbleiterbauelemente, verwendet, mit welchem eine konstante Spannung für eine einstellbare Zeitspanne eingestellt werden kann. Somit konnte man fest davon ausgehen, dass die Diode ohne einen Spannungseinbruch konstant in Durchlassrichtung betrieben wurde. Die Messdauer der Emission wurde mithilfe der Phemos-Software eingestellt. Mit welchen Durchlassspannungen und wie lange gemessen wurde, wird in der Auswertung der Messergebnisse angegeben.

Am Ende jeder Messung wurde noch eine Dark-Substraction durchgeführt. Bei dieser Dark-Substraction wird die Durchlassspannung abgeschaltet, wodurch die Diode nicht mehr als aktiv betrachtet wird. Die Emissionsmessung wird mit der gleichen Messdauer und deaktivierter Diode nochmal durchgeführt und von der eigentlichen Emissionsmessung subtrahiert, damit jegliche Rauscheinflüsse des Phemos selbst aus den Messergebnissen ausgeschlossen werden können.

3.4 Messergebnisse

Die Active-Area- und Kontaktfenstermasken wurden so erstellt, dass der Wafer am Ende der Produktion Dioden auf jedem Die besaß, die für diese Emissionsmessung hergestellt wurden. Diese Emissions-Dioden haben die Besonderheit, dass zwischen p- und n-Pad das Substrat nicht mit Siliziumoxid beschichtet ist, damit an den pn-Übergang zwischen n-Gebiet und p-Substrat unverfälschte Emission gemessen werden kann.

Man hätte annehmen können, dass dort, wo Oxid auf dem pn-Übergang lag, keine Emission aus dem Wafer austreten und gemessen werden kann. Die Praxis bewies aber das Gegenteil. Unabhängig von der Auswertung der Messung konnte an den pn-Übergängen mit Siliziumoxid darüber eine viel stärkere Emission gemessen werden. Der Grund dafür liegt in dem Brechungsindex und der Dicke der Oxidschicht, denn durch die Reflexionen der Strahlung an den Übergängen von Silizium zu Siliziumoxid und Siliziumoxid zur Luft werden die Strahlen so reflektiert, dass konstruktive Interferenz zwischen den Lichtwellen entsteht und somit die Emission als viel stärker wahrgenommen wird. Da dies nicht die wirkliche Intensität der Emission am pn-Übergang unserer Diode widerspiegelt, wurden diese mit Oxid überlagerten Stellen in der Emissionsmessung vernachlässigt.

Gemessen wurde nur der Bereich von der Grenze des n-Gebiets bis in das p-Substrat hinein. Als Hilfe dafür wurde das jeweilige Emissionsbild der Phemos-Software verwendet. Diese zeigte mit farblichen Unterschieden (rot = starke Emission, blau = schwache Emission) wo der sinnvolle Messbereich begann und endete. Die folgenden Abbildungen zeigen die Diode vor und nach der Emissionsmessung auf dem Die in Zeile 6 und Spalte 3 des Wafers. Zunächst wurde eine große, dann eine kleinere Emissions-Diode ausgemessen. Bei beiden betrug die Durchlassspannung 1,2 V bei 25 mA und einer Messdauer von 4s.

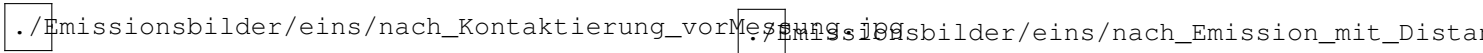


Abb. 8: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD Kamera

Abb. 9: selbe Diode nach der Emissionsmessung

Der gelbe Strich wurde anhand der Maus gezogen und zeigt den Bereich im Substrat, welcher genauer ausgewertet wurde. Mehr dazu folgt in der Auswertung.

Als nächstes folgen die Abbildungen der kleineren Emissions-Diode auf dem selben Die:



Abb. 10: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD Kamera

Abb. 11: selbe Diode nach der Emissionsmessung

Nun wurde noch ein Die am Rand des Wafers ausgemessen um nach Unterschieden zwischen den Messergebnissen kontrolliert werden zu können. Auch auf dem Die in Zeile 15 und Spalte 8 wurde erst eine große, dann eine kleine Emissions-Diode untersucht. Die Durchlassspannung bei der großen Diode betrug $1,2\text{ V}$ bei einem Strom von 25 mA . Die Messdauer wurde aus 3 s variiert.

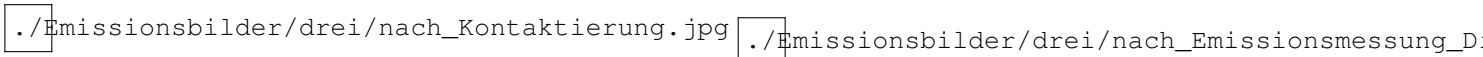


Abb. 12: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD Kamera

Abb. 13: selbe Diode nach der Emissionsmessung

Die Durchlassspannung der kleineren Diode betrug $1,5\text{ V}$ bei 30 mA Strom. Die Messdauer wurde auf 4 s gestellt. Vor und nach der Messung wurden folgende Bilder aufgezeichnet:

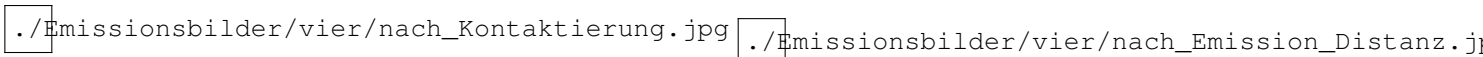


Abb. 14: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD Kamera

Abb. 15: selbe Diode nach der Emissionsmessung

Bislang ist nur eine Emissionsintensität zu sehen. Mithilfe der Phemos-Software konnte daraus ein Intensitätsprofil erstellt werden, woraus am Ende dann auf die Diffusionslänge zurück geschlossen werden kann.

Es wurde auch eine Fingerstruktur-Diode für die Messung verwendet, welche sich ebenfalls auf dem äußeren Die befand. Eine Diffusionslängenberechnung wurde für diese Diode nicht durchgeführt, da am Phemos ein Objektiv gewählt wurde,

mit der die gesamte Diode auf des Bildschirm sichtbar war. Daher sind die Fingerstrukturen zwar sichtbar, aber die pn-Übergänge zwischen n-Finger und dem p-Substrat dazwischen, die Grenze an der die Emission erwartet wird, sind viel zu klein abgebildet, als dass eine Intensitätskurve mit der geringen Vergrößerung sinnvoll wäre. Daher sind nur die Kontaktierung und das Ergebniss der Emissionsmessung im Protokoll aufgeführt. Die Durchlassspannung während der Messung betrug 5 V bei einem Strom von 20 mA und einer Messdauer von 4s.



 ./Emissionsbilder/fuenf/nach_Kontaktierung.jpg  ./Emissionsbilder/fuenf/SuperImpose.jpg

Abb. 16: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD Kamera

Abb. 17: selbe Diode nach der Emissionsmessung

Man kann erkennen, dass die n-Finger, welche von links nach rechts Richtung p-Pad reichen, die Positionen der pn-Übergänge bilden. Daher wäre eigentlich eine Emission entlang der Ränder der n-Finger zu erwarten. Eine Erklärung, warum aber die größte Emission nur an der Stelle auftritt, wo der Abstand zwischen n- und p-Pad am geringsten ist, wäre, dass die Rekombination hinter der Raumladungszone dort viel größer ist, wo der Halbleiter den geringsten Widerstand aufweist. Der Strom könnte also dort am größten werden, wodurch eine stärkere Emission erklärt wäre.

3.5 Auswertung

Die Phemos-Software ist in der Lage, aus der Messung eine Wertetabelle zu erstellen, welche die jeweilige Strahlungsintensität an dem betrachteten Punkt im Substrat ausgibt. Mit diesen Werten konnte die Strahlungsintensität, welche den Erwartungen nach einen exponentiellen Abstieg aufweisen sollte, nachgebildet werden. Um zur gesuchten Diffusionslänge zu gelangen wird diese Kurve nun logarithmisch aufgetragen. Denn wenn man sich nochmal die relevante Proportionalität ansieht:

$$I(x) \sim \Delta n \sim \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)$$

$$\log(I(x)) \sim -\frac{x}{L_n}$$

dann erkennt man, dass eine Logarithmierung des Exponentialterms nur das Argument übrig lässt. Daher sollte aus jeder Intensitätskurve eine absteigende Gerade entstehen, welche eine Steigung von $-\frac{1}{L_n}$ besitzt. Über den Reziprokwert dieser Steigung kann man dann die Diffusionslänge L_n der Dioden berechnen.

Beginnend mit der ersten Messung wird die Intensitätskurve mit dem exponentiellen und dem logarithmischen Verlauf geplottet und analysiert:

Abb. 18: Intensitätskurve der 1.Messung, exponentiell und logarithmisch

Die blaue Kurve zeigt den exponentiellen, die rote Kurve den logarithmischen Verlauf. Aus dieser wird nun der Kehrwert der Steigung ermittelt, welche eine Diffusi-

./Emissionsbilder/eins/Intensitatsmessung.pdf

onslänge von $304,2 \mu m$ liefert.

Die zweite Messung an der kleineren Diode im selben Die liefert folgende Intensitätsverläufe

Abb. 19: Intensitätskurve der 2.Messung, exponentiell und logarithmisch

und, mit der analogen Berechnung, eine Diffusionslänge von $304,6 \mu m$.

Die dritte Messung an der großen Emissions-Diode am Rand des Wafers, liefert folgende Intensitätsverläufe

Abb. 20: Intensitätskurve der 3.Messung, exponentiell und logarithmisch

und eine Diffusionslänge von $304,3 \mu m$, wohingegen die kleinere Diode auf dem äußeren Die diese Kurven

Abb. 21: Intensitätskurve der 4.Messung, exponentiell und logarithmisch

mit der Diffusionslänge von erneut $304,6 \mu m$ wiedergibt.

Obwohl diese Werte weit über dem Erwartungswert einer Diffusionslänge von $150 - 200 \mu m$ liegen, spricht es für die Messung, dass alle Werte ziemlich gleich groß sind. Da alle gemessenen Dioden sich auf demselben Wafer befinden und somit alle gleich dotiert und behandelt wurden, ist es auch verständlich, dass die Diffusionslängen nicht bedeutend viel voneinander abweichen. Die vermutete Ursache für die dennoch zu großen Diffusionslängen könnte in dem Dotierungsschritt während der Wafer-Herstellung liegen. Eventuell wurde im Reinraum ein unbemerkter Fehler begangen, der zu größeren L_n s führte.