



TU Berlin Fakultät IV

Fachgebiet Halbleiterbauelemente

Praktikum Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik

## **Praktikum Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik**

Thomas Kapa (325 319)  
Alona Siebert (303 843)  
Özgü Dogan (326 048)  
Dirk Babendererde (321 836)

23. Oktober 2012

Gruppe 1

Betreuer:  
Clemens Helfmeier  
Philipp Scholz

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Die Herstellungsschritte</b>	<b>1</b>
1.1 Wafervorbereitung . . . . .	1
1.1.1 Nummerierung . . . . .	1
1.1.2 Reinigung . . . . .	1
1.1.3 PECVD . . . . .	1
1.1.4 Lithographie mit der AA-Maske . . . . .	2
1.2 Tag 1 . . . . .	3
1.2.1 Verhaltensregeln in dem Reinraum . . . . .	3
1.2.2 Dotierstoff aufbringen . . . . .	4
1.2.3 Diffusionsofen . . . . .	5
1.3 Tag 2: . . . . .	7
1.3.1 Sichtkontrolle . . . . .	7
1.3.2 Ätzen (Entfernen des Phosphorglasses) . . . . .	8
1.3.3 Lithographie mit der KF-Maske . . . . .	9
1.3.4 Sichtkontrolle . . . . .	12
1.4 Tag 3 . . . . .	14
1.4.1 PVD & Metallisieren . . . . .	14
1.4.2 Lithographie mit der AL-Maske . . . . .	15
1.4.3 Endergebnis . . . . .	18
1.5 Tag 4 . . . . .	19
1.5.1 Schrägschliff . . . . .	19
1.5.2 Dekoration . . . . .	20
1.5.3 Auswertung der Junction Tiefe . . . . .	21
1.6 Schlussbetrachtung . . . . .	21
<b>2 Kennlinie</b>	<b>23</b>
2.1 Messaufbau . . . . .	23
2.2 Auswahl der zu messenden Diode . . . . .	23
2.3 Erwartete Kennlinie	23
2.3.1 Dunkelkennlinie . . . . .	23
2.3.2 Beleuchtete Kennlinie . . . . .	24
2.4 Messergebnisse . . . . .	24
2.4.1 Dunkelkennlinie . . . . .	24
2.4.2 Beleuchtete Kennlinie . . . . .	27
2.5 Auswertung . . . . .	28
<b>3 Schaltverhalten</b>	<b>29</b>
3.1 Einführung . . . . .	29
3.2 Theorie . . . . .	29
3.3 Durchführung und Auswertung . . . . .	35
3.4 Zusammenfassung . . . . .	41
<b>4 Emissionsmessung</b>	<b>42</b>
4.1 Direkter und indirekter Halbleiter . . . . .	42
4.1.1 direkter Halbleiter . . . . .	42
4.1.2 indirekter Halbleiter . . . . .	43
4.2 Rekombinationsmechanismen . . . . .	44
4.2.1 strahlende Rekombination . . . . .	44
4.2.2 nichtstrahlende Rekombination . . . . .	45
4.3 Messaufbau . . . . .	46
4.4 Messergebnisse . . . . .	47
4.5 Auswertung . . . . .	50

## 1 Die Herstellungsschritte

### 1.1 Wafervorbereitung

#### 1.1.1 Nummerierung

Einige Schritte der Waferherstellung waren bereits schon vor unserem Praktikum durch die betreuenden Labormitarbeiter durchgeführt.

Die an sich runden Wafer haben zwei Flats: großes tieferes Flat gibt die Kristallrichtung des monokristallinen Wafers an und das kleinere Flat gibt den Dotierstoff an. Die für unser Praktikum verwendeten Wafer haben p-Type Substrat und wurden mit Bor vordotiert.

Danach wurde jeder Wafer auf der Rückseite nummeriert (s. Abb. 1). Die Nummern waren 120501, 120502 und 120503.

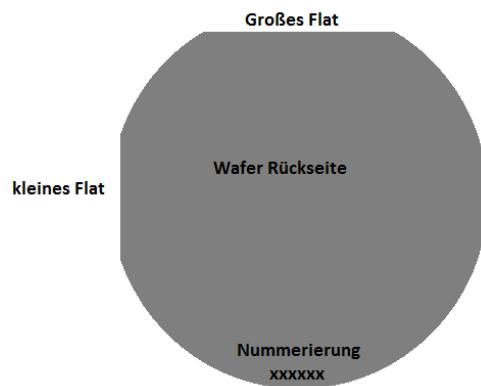


Abb. 1: Schema für die Beschriftung

#### 1.1.2 Reinigung

Die Wafer wurden nun vor dem Herstellungsprozess gereinigt. Diesen Schritt braucht man um diverse kleine Partikeln aus der umgebenden Luft, die sich auf der Oberfläche des Wafers ablagern, zu entfernen. Außerdem können metallische Rückstände bei der Nummerierung der Wafer auftreten. Es wurde ein RCA-Reinigungsprozess verwendet, der aus zwei Schritten besteht: Standard-Clean 1 und Standard-Clean 2 (SC1 & SC2).

SC1 wird zum Entfernen von organischen Resten verwendet: Wafer wird zehn Minuten lang in einer Lösung, bestehend aus dem deionisierten Wasser  $H_2O$ , Ammoniak  $NH_4+OH$  und Wasserstoffperoxid  $H_2O_2$  im Verhältnis 5 : 1 : 1, gespült. Außerdem wurde ein HF-Dip mit 1%iger Lösung 25 Sekunden lang durchgeführt, um das natürliche Oxid von der Oberfläche zu entfernen. SC2 wird zum Entfernen von metallischen Resten benutzt. Dafür wird der Wafer mit einer wässrigen Lösung aus Salzsäure und Wasserstoffperoxid im Verhältnis 6 : 1 : 1 behandelt.

Dabei soll man unbedingt die Warnhinweise beachten. Da bei der Reinigung verwendete Lösungen sehr gefährlich (sehr giftig und stark ätzend) sein können, muss man unbedingt bei der Arbeit mit diesen Lösungen geeignete Schutzbekleidung und geeignete Schutzhandschuhe tragen. Beim Kontakt mit diesen Lösungen soll man sofort gründlich mit Wasser abspülen und den Arzt konsultieren.

#### 1.1.3 PECVD

Nach der Reinigung waren die Wafer mit einer dünnen chemischen Oxidschicht ( $SiO_2$ ) bedeckt. Da diese Schicht zu dünn ist, wird ein RTP-Prozess (Rapid Thermal Processing) benötigt. Der Wafer wurde auf ca. 1200 °C erhitzt. Die umgebende Luft reagiert mit den Si-Atomen auf der Oberfläche und es bildet sich dabei eine ca. 60 nm-dicke Siliziumoxid-Schicht. Danach wurde ein PECVD Prozess (Plasma

## 1 DIE HERSTELLUNGSSCHRITTE

---

Enhanced Chemical Vapor Deposition) benutzt: Es scheidet sich die Oxidschicht auf der Oberfläche ab, die 250 nm dick ist.

Bei der PECVD erfolgt die Abscheidung von dünnen Schichten durch eine chemische Aktivierung des Reaktionsprozesses, die durch ein Plasma unterstützt wird. Für die Schichtbildung werden die Ausgangsstoffe als Gasgemisch in einen Rezipienten eingelassen. Durch erhitztes Plasma werden die Bindungen des Reaktionsgases aufgebrochen und in Radikale zersetzt, die sich auf dem Substrat niederschlagen und dort die chemische Abscheidereaktion bewirken. Der PECVD-Prozess lief unter 400 °C ab. Die Oxiddickenmessung danach ergab ca. 400 nm.

Nach dem PECVD-Prozess wurde noch mal RTP-Tempern benötigt, um das Oxid in das Gitter einzufügen und damit das Oxid an der Oberfläche des Substrats gut haften kann. Bei RTP wurde der Wafer 120 Sekunden lang auf 1000 °C erhitzt. Die Oxiddickenmessung mit dem Photometer danach ergab ca. 420 nm.

### 1.1.4 Lithographie mit der AA-Maske

Bei dem lithographischen Prozess wurden die Strukturen für die Diffusion der n-Wannen vorbereitet. Als erstes werden die Wafer von den möglichen Wasser- und Flüssigkeitsresten befreit. Dafür wird der Wafer 30 min. lang bei 200 °C auf einer Heizplatte erhitzt.

**HMDS** Außerdem hilft es ein Haftmittel HMDS (Hexamethyldisilazan) auf den Wafer aufzutragen: die Wafer werden in eine Vakuumsglocke gelegt, es muss 30 Sekunden lang abgepumpt werden, um das Vakuum zu erzeugen. HMDS lagert sich an der Oberfläche des Wafers ab (die Dauer beträgt fünf min.). Anschließend werden die Wafer eine Minute lang auf der Heizplatte getrocknet.

**Belacken & Softbake** Die Wafer werden auf einen Schleuderapparat gelegt und mit dem AZ 5214 Lack beschichtet. Mit dem Schleuderprogramm werden die Wafer auf 4000 U/min beschleunigt. Nach der 20-minütigen Pause werden die Wafer bei 90 °C zwei min. lang getrocknet, damit der Lack fest wird.

**Belichten** Nun werden die Wafer mit der Active Area Mask (AA-Maske) abgedeckt und vier Sek. belichtet.

**Entwickeln & Hardbake** Nach der Belichtung wurde der Lack in einer Rohm Haas - Lösung 70 Sekunden lang entwickelt. Danach wurden alle Wafer auf einer Heizplatte unter 120 °C fünf min. lang erhitzt, damit der restliche Lack gegen Ätzmittel noch resistenter wird. Die Inspektion mit dem Photometer ergab die Dicke des Photolackes ca. 1.9  $\mu\text{m}$ .

**nass-chemisches Ätzen** Mit dem Nass-chemischen Ätzen werden die Fenster zum Substrat wegätiert. Die Wafer wurden in der BHF-Lösung (mit Ammoniumfluorid gepufferte Flusssäure) ca. 6,5 min. gehalten.

**Fotolack entfernen** Der Lack wurde mit Caro's Etch - Lösung entfernt, indem die Wafer für zehn min. lang in diese Lösung eingetaucht wurden.

Die untere Abbildung 2 zeigt die Struktur, wie wir unsere Wafer als Ausgangsmaterial für unseres Praktikum erhalten haben:



Abb. 2: Ausgangsstruktur

### 1.2 Tag 1

#### 1.2.1 Verhaltensregeln in dem Reinraum

Als erstes, vor dem Eintritt in den Reinraum, erhielten alle Teilnehmer eine Sicherheitseinweisung vom Herrn Bruhns, dem Laborleiter. Die Vorschrift ist: Schutzoveralls, spezielle Schuhe, die eine Erdung zum Boden enthalten, und Handschuhe (s. Abb. 3) zu tragen. Bei der Arbeit mit Chemikalien müssen die Augen zusätzlich geschützt werden. Dazu kann man entweder die Gesichtsschutzmaske oder die Brille tragen.

Essen und Trinken im Reinraum sind streng verboten. Außerdem sollte das Verlassen und Wiederbetreten möglichst vermieden werden, da bei jedem Betreten die Partikeln eingeschleppt werden können, die die Reinheit des Labors vermindern.

Weil mit den toxischen Substanzen gearbeitet wird, dürfen die Schwangeren das Praktikum nicht durchführen.



Abb. 3: Teilnehmer des Praktikums: Thomas, Özgür,  
Dirk, Alona

## 1 DIE HERSTELLUNGSSCHRITTE

### 1.2.2 Dotierstoff aufbringen

Als erstes haben wir unsere drei Wafer unter dem Lichtmikroskop untersucht, um die Struktur der Wafer zu sehen. Da die Oxide das Licht reflektieren, daher ist auch die grüne Farbe im Mikroskop zu sehen (s. Abb. 4) Es wurden keine großen Schäden gefunden.

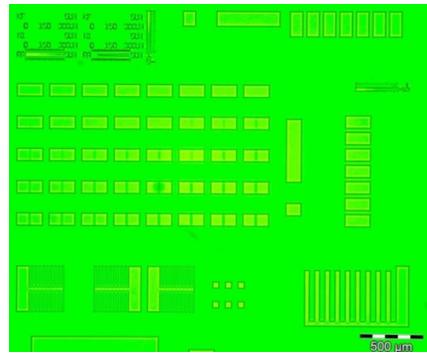


Abb. 4: Struktur des Wafers

Nun wird der Dotierstoff Phosphorus p 509 aufgetragen.



Abb. 5: Phosphorusflasche



Abb. 6: Dotierstoff auftragen

Um gleichmäßige Verteilung des Dotierstoffes zu bekommen, wurde die Auftragung der Phosphorlösung mit einem Lackschleuderbeschichtungsapparat (s. Abb. 6) durchgeführt. Auf einem Drehtisch wird der Wafer zentral justiert und mittels Vakuum fixiert, damit der Wafer bei der Drehung am Teller gut haftet. Mit Hilfe von Dispenser (der zwei Mal gedrückt wurde) wird der Dotierstoff auf den Wafer getropft. Danach muss der Wafer sofort in Rotation gebracht werden, um eine ebenmäßige Dotierstoffsicht zu bekommen. Bei der Rotation wird die überflüssige Stoffmenge von der Scheibe weggeschleudert. Es bleibt nur eine sehr dünne Phosphorschicht auf dem Wafer.

Bedingungen beim Aufschleudern der Phosphorlösung:

Programm 4  
2500 U/min (Anzeige 250)  
2 ml Lösung

Bemerkung: der Wafer 120503 wurde doppelt mit dem Dotierstoff beschichtet (ca. 4 ml). Anschließend wurden alle drei Wafer auf der Heizplatte 15 Minuten lang bei 200°C gebacken. Bei diesem Prozessschritt bildet sich ein Phosphorglas (Silikat). Dabei wurde eine Dampfwolke beobachtet. Das Ergebnis nach diesem Vorgang ist in der Abbildung 7 zu sehen.

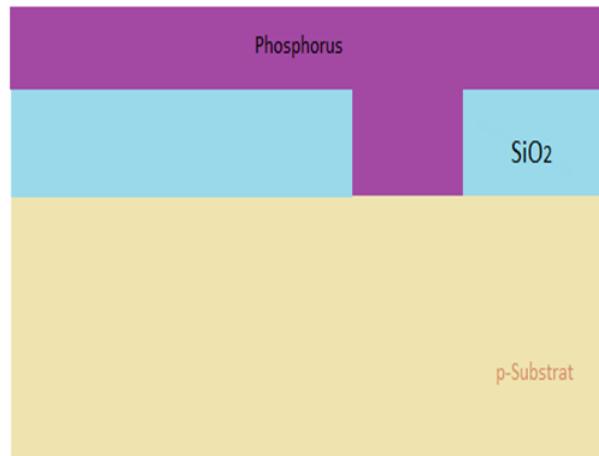


Abb. 7: Wafer bedeckt mit Phosphorglas

Eine Sichtkontrolle mit dem Lichtmikroskop hat uns folgendes ausgegeben (Abb. 8): Zu beobachten war: Bei dem Wafer 02 waren Bläschen stärker, der Wafer 03 hatte fast gar keine Bläschen, die Struktur war ebenmäßiger und er enthielt so viel Dotierstoff, dass die Fenster kaum zu sehen waren. Der Wafer 01 hatte große Bläschen, die ständig Ihre Form verändert haben (Abb. 8).

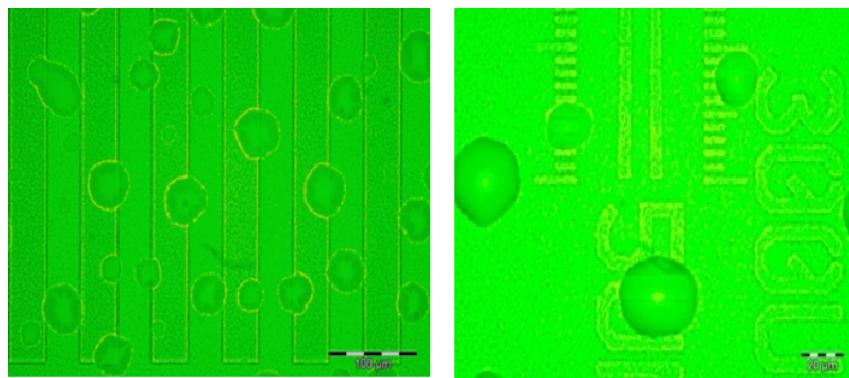


Abb. 8: Lichtmikroskopbild, Wafer01

### 1.2.3 Diffusionsofen

Jetzt kommen die Wafer in den Diffusionsofen.

Als erstes wurden die Wafer so in dem Quarzschildchen (Abb. 9) eingesortiert, dass sich die Vorderseiten der Wafer 01 und 02 gegenüber stehen. Wafer 03 wurde einsam auf der anderen Seite des Quarzschildchens platziert.

## 1 DIE HERSTELLUNGSSCHRITTE

---

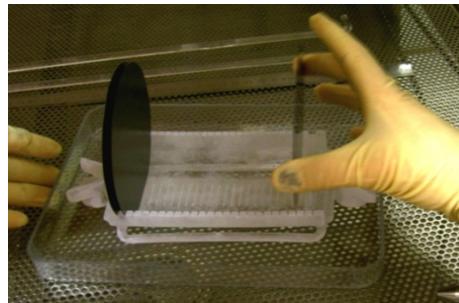


Abb. 9: Quarzschildchen



Abb. 10: Einbringen in den Diffusionsofen

Dann wird das Schlitten 65 cm tief im Ofen platziert, damit die Wafer sich möglichst in der Ofenmitte befinden. Zum Abschluss wurde anschließend noch ein Quarzhohlzylinder in den Ofen (Abb. 10) geschoben, um die Temperaturhaltung zu verbessern. Der Prozess der Diffusion findet unter dem Durchströmen des Diffusionsofens (Abb. 11) mit dem Prozessgas für zehn min. bei der Temperatur von 1000°C.



Abb. 11: Diffusionsofen

Nach dem Diffusionsprozess verblieben die Wafer noch zum langsamen Auskühlen über die Nacht im Ofen.

Nach der Diffusion sieht unsere Struktur so aus (Abb. 12):

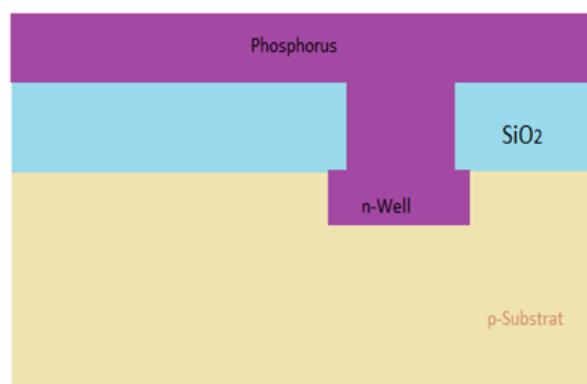


Abb. 12: Struktur nach dem Diffusionsofen

### 1.3 Tag 2:

Am zweiten Tag haben wir unsere Wafer aus dem Ofen genommen. Dabei haben wir beobachtet, dass der Wafer 03 glänzend und der Wafer 01 und 02 matt waren. Danach wurden alle Wafer einer Sichtkontrolle unter dem Mikroskop unterzogen und mit dem Photometer wurde die Schichtdicke gemessen.

#### 1.3.1 Sichtkontrolle

**Photometer** Das Photometer Ergolux (Abb. 14) besteht aus einem Mikroskop mit einem Aufsatz, der Licht bestimmter Wellenlängen (zwischen 400 nm und 800 nm ) auf den Wafer strahlt und über die Reflexion der Lichtquanten der unterschiedlichen Wellenlängen den Aufschluss über die Schichtdicke gibt.

Zur Kalibrierung muss das Photometer mit einer Musterprobe justiert werden(mit dem Flat nach unten): die Musterprobe (ein nicht beschichteter Siliziumwafer) soll auf den Objekthalter so platziert werden, damit man die Bildschärfe einstellen kann. Dann startet man das Programm Justage. Danach wird es ohne Musterprobe auf dem Objekthalter noch mal gestartet. Nur dann können wir unsere Wafer messen. Die Messergebnisse für unsere drei Wafer sind in der Tabelle 1 unten zusammengefasst.

Tab. 1: gemessene Phosphorglasdicke in nm

Wafer	oben	mittig	unten	links	rechts
120501	82.3	78.1	86.8	85.4	73.2
120503	770.1	784.8	765.3	764.8	776.2

Die Wafer 01 und 02 waren nicht gut messbar! Der Wafer 03 hat dagegen fast perfekte Messergebnisse 13.

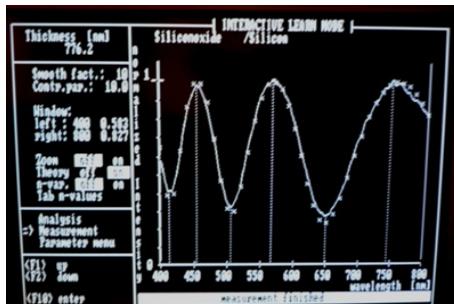


Abb. 13: Photometermessung



Abb. 14: Photometer

**Sichtkontrolle unter dem Lichtmikroskop**

Wafer02 (Abb. 16) und Wafer01 (Abb. 15):keine klare

Struktur(wegen sehr guten Diffusion??)

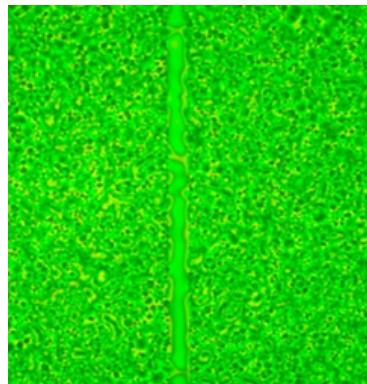


Abb. 15: Lichtmikroskopbild Wafer01

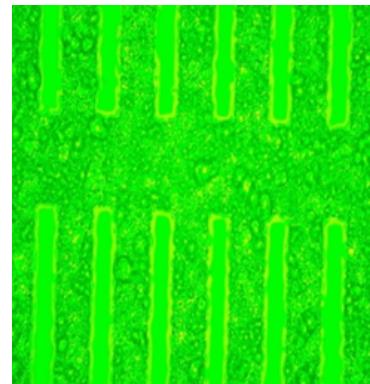


Abb. 16: Lichtmikroskopbild Wafer02

Wafer03: man kann einen großen Farbunterschied sehen. Die Schicht machte optisch einen guten Eindruck, die Struktur ist sehr klar.

### 1.3.2 Ätzen (Entfernen des Phosphorglasses)

Jetzt wird das Phosphorglas entfernt. Dazu wird zuerst der Wafer01 in die 2.5%-ige Flusssäure für ca. fünf Minuten lang eingetaucht, um das Phosphorglas von der Oberfläche zu entfernen. Übrig bleibender Phosphor wurde anschließend mit dem Wattestäbchen entfernt und in Di-Wasser gesäubert. Da die Flusssäure stark ätzend ist, müssen ein extra dicker Schutanzug, Augenschutz und dicke Handschuhe getragen werden (Abbildung 17). Nach dem Ätzen prüften wir die Dicke mit dem Photometer und stellten fest, dass wir die ganze Schicht wegätzten!! Die Sichtkontrolle mit dem Lichtmikroskop 18 zeigte, dass Struktur noch da war, deswegen wurde entschieden den Wafer02 für Schrägschliff zu verwenden.



Abb. 17: Schutzbekleidung

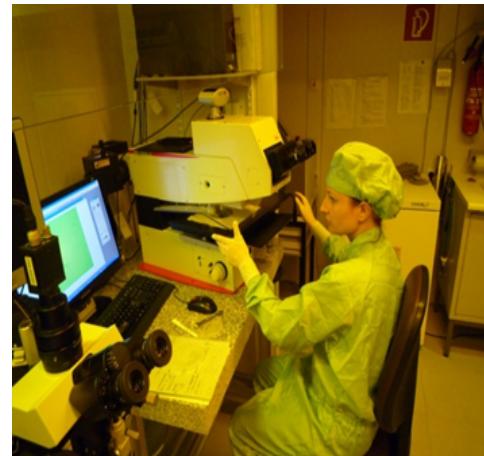


Abb. 18: Am Lichtmikroskop

Der Wafer02 wurde dann zwei Mal geätzt: ein Mal sehr vorsichtig mit der 2.5%-igen Flusssäure nur für eine Minute und danach mit der 1%-igen nur für fünf Sekunden, jedes Mal wurde die Dicke gemessen. Der Wafer03 wurde schon mehrmals geätzt: zwei Mal sehr vorsichtig mit der 1%-igen Flusssäure für eine Minute, dann mit der 1%-igen nur für fünf Sekunden. Jedes Mal wurde die Dicke kontrolliert. Die Ergebnisse der Oxiddickenmessung sind in der Tabelle 2 dargestellt.

## 1 DIE HERSTELLUNGSSCHRITTE

---

Tab. 2: Oxiddickenmessung nach dem Ätzen

Wafer	oben	mittig	unten	links	rechts
120502	196.5	199.9	198	205	195
120503	201	202	203.7	186.7	203

Nach dem Ätzen sieht unsere Struktur folgendermaßen aus [19](#):



Abb. 19: Struktur nach dem Ätzen

Anschließend wurden die Wafer mit dem Stickstoff trocken gepustet und für ca. 15 min. bei 200 °C auf eine Heizplatte gelegt, um die molekulare Flüssigkeitsreste von der Oberfläche des Wafers zu entfernen (sie stören die Haftung des Photolacks).

### 1.3.3 Lithographie mit der KF-Maske

**HMDS** Die Wafer 02 und 03 werden direkt von der Heizplatte [21](#) in Exikator, eine so genannte Vakuumglocke(s. Abb [20](#)) mit dem Haftmittel HMDS (Hexamethyldisilazan), gebracht.



Abb. 20: Vakuumglocke

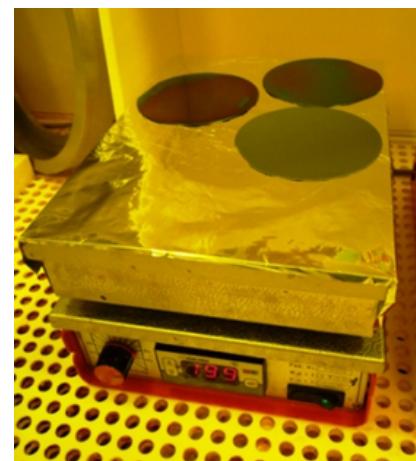


Abb. 21: Heizplatte

Es wird das Vakuum für 30 Sekunden lang abgepumpt, HMDS verdampft und lagert sich an der Oberfläche des Wafers ab. Es wird ca. fünf Minuten beschichtet, danach wird das Druckventil sehr langsam gedreht und der Druck abgelassen. Anschließend werden die Wafer für eine Minute bei 120 °C auf die Heizplatte gelegt.

## 1 DIE HERSTELLUNGSSCHRITTE

---

**Belacken und Softbake** Nachdem die Wafer getrocknet waren, wurden sie mit einem Positivlack AZ 5214 beschichtet (s.Abb 22 und 23). Beim Drehen der Schleuder, wenn sich der Lack ausbreitet, beobachtet man die farbigen Wellen. Es sind die Interferenzwellen von den Lackschichten. Je länger die Schleuderzeit ist, desto gleichmäßiger ist die Lackschicht.

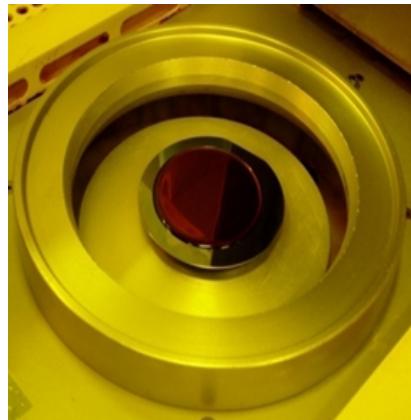


Abb. 22: Waferbeschichtung



Abb. 23: Lackflasche

Nach dem Lackieren muss der Wafer 30 Minuten lang in der halboffenen Schachtel ruhen, damit die Gasbläschen rauskommen und der Lack in die kleinsten Rauigkeiten der Oberfläche eindringen kann. Anschließend wurden die Wafer bei 90°C zwei Minuten auf der Heizplatte erhitzt, um den Lack zu fixieren. Sehr wichtig, dass die Wafer sich sehr langsam abkühlen müssen!

**Belichten mit der KF-Maske** Das Belichten des Wafers erfolgt auf dem Belichtungsapparat: Dieser Lithographie-Apparat hat die Belichtungshaube, darunter ist der Waferhalter und Maskenhalter(s.Abb. 24), Mikroskop mit einer CCD-Kamera und einem Bildschirm. Ganz wichtig ist es, dass die Maske und der Wafer genau übereinander liegen, damit der Wafer an den nötigen Stellen belichtet werden kann. Als erstes wurde Maskenjustierer angeschaltet und die Lampe vorgewärmt. Auf dem Bildschirm kann man die unten erscheinenden Anleitungen befolgen. Weiter wurde die Maske geladen und mit dem Vakuum festgehalten. Die KF-Maske wurde genau an der AA-Maske justiert (man kann die Justierung in der Abbildung 25 sehen, wo die Kreuze übereinanderliegen).

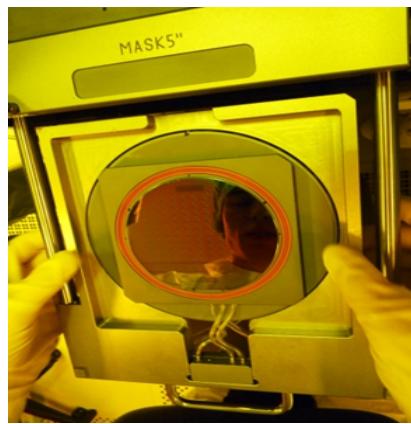


Abb. 24: Maskenhalter



Abb. 25: Justievorgang

Der Wafer wurde ausgerichtet, mit dem Vakuum festgehalten und hineingeschoben. Dann justiert man den Wafer so, dass er genau unter der Maske liegt.

## 1 DIE HERSTELLUNGSSCHRITTE

Danach drückt man die Taste Exposition und der Wafer wird durch die Maske belichtet (Abb.27). Das Licht befindet sich im UV-Bereich. Bei dem Belichtungsprogramm gibt es verschiedene Belichtungsarten, wir haben uns für die Soft-Kontakt-Belichtungsart entschieden, weil es die schonendste Methode ist. Der Wafer 02 wurde vier Sekunden lang belichtet. Der Moment der Belichtung ist in der Abbildung 26 zu sehen.

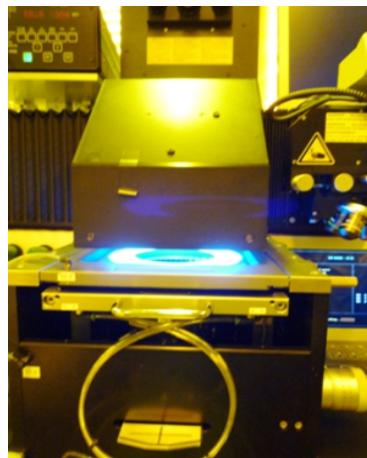


Abb. 26: Belichtungsvorgang

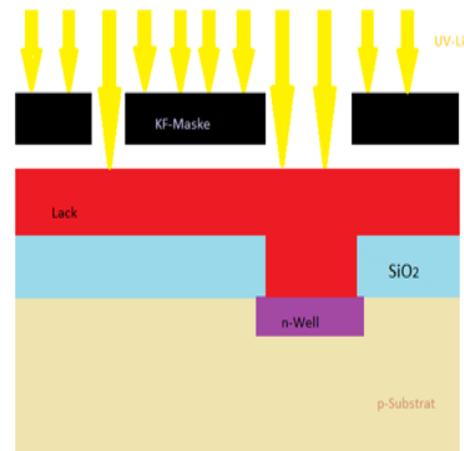


Abb. 27: Belichtungsstruktur

Die durchsichtigen Bereiche der Maske lassen das Licht durch und der Wafer wird belichtet. Durch das Belichten wird der Lack härter. An den Stellen, die nicht belichtet wurden, wird der Lack später mit einer Rohm-Haas Lösung abgezogen. Die Belichtungszeit stimmte für den Wafer02, deswegen wurde der Wafer03 auch mit dieser Zeit belichtet. Leider wurde beim Justieren der Wafer03 ein Stückchen Lack an der Maske angeklebt. Wir haben sofort überlegt, ob es beim Entwickeln zu den Fehlern kommen kann.

**Entwickeln und Hardbake** Nach dem Belichtungsprozess wurde der Lack möglichst schnell mit Hilfe von Entwickler Rohm-Haas 28 entfernt.

Die Wafer wurden 60 Sekunden lang in dieser Lösung gespült. Nach dem Entwicklungsprozess muss der Entwickler ganz schnell weg von der Waferoberfläche und sehr gründlich mit dem Wasser abgespült werden (s. Abb. 29). Um den restlichen Lack gegen Ätzmittel noch resistenter zu machen: Hardbake fünf Minuten lang, 120°C .

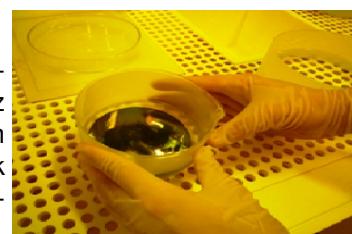


Abb. 28: Entwickeln

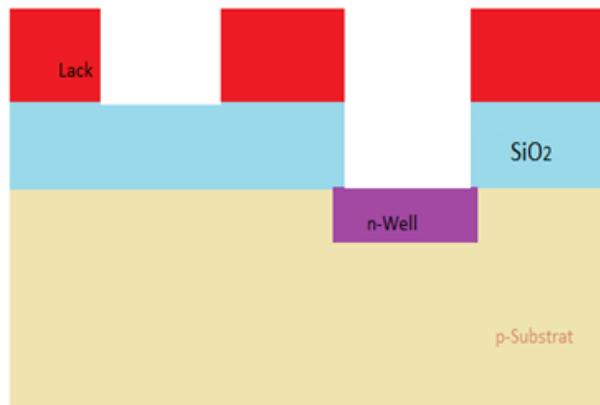


Abb. 29: Struktur nach dem Entwickeln

### 1.3.4 Sichtkontrolle

**Mit dem Lichtmikroskop:** Nun sollen die Wafer mit dem Mikroskop untersucht werden. Wie wir es schon erwartet haben, der angeklebte Lack hat sich bemerkbar gemacht: Die Struktur ist nicht mehr sehr deutlich zu sehen, viele untergeätzte Stellen (Abb. 30):

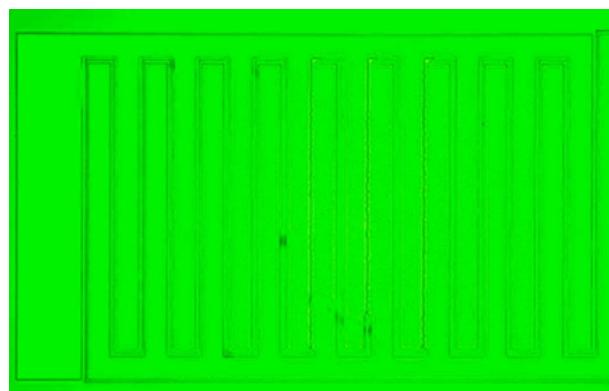


Abb. 30: Lichtmikroskopbild

**Dektak-Messung:** Nun wurden die Lackdicken von den Wafern 02 und 03 am Dektak gemessen. Der Dektak ist ein Profilometer mit dem sich die mikroskopische Oberflächenrauigkeit ermitteln lässt. Ein Mal haben wir über dem p- und das andere Mal über dem n-Pad gemessen 31:

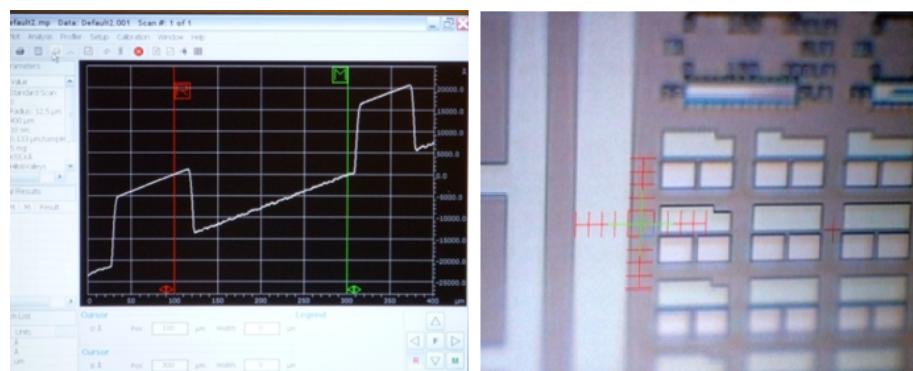


Abb. 31: Messungen am Dektak

## 1 DIE HERSTELLUNGSSCHRITTE

---

Die Tabelle 3 zeigt das Ergebnis:

Tab. 3: Messergebnisse der Lackdickenmessung

Wafer	p-Pad	n-Pad
120502	1.5 $\mu\text{m}$	185 nm
120503	1.55 $\mu\text{m}$	182 nm

**Ätzen** Diesmal wurde das Ätzen vorsichtig mehrmals durchgeführt. Dafür haben wir 1%-ige gepuffte Flusssäure BHF ( $\text{HF}/\text{NH}_3\text{F}$ ) benutzt. Jeder Wafer wurde in dieser Lösung für ca. eine min. eingetaucht und sofort mit Di-Wasser abgespült. So entstehen die Oxidfenster (Abb. 32).



Abb. 32: Struktur nach dem Ätzen

Zwischen den Ätzungen haben wir ständig die Oxiddicke mit Dekta kontrolliert. Die Dektamessung zeigte uns, dass der Ätzvorgang sehr langsam abläuft. Die Kontrolle am Lichtmikroskop hat aber folgendes gezeigt 33: Wafer03 wurde total übergeätzt! Starke Dotierung wurde als mögliche Ursache dafür vermutet.

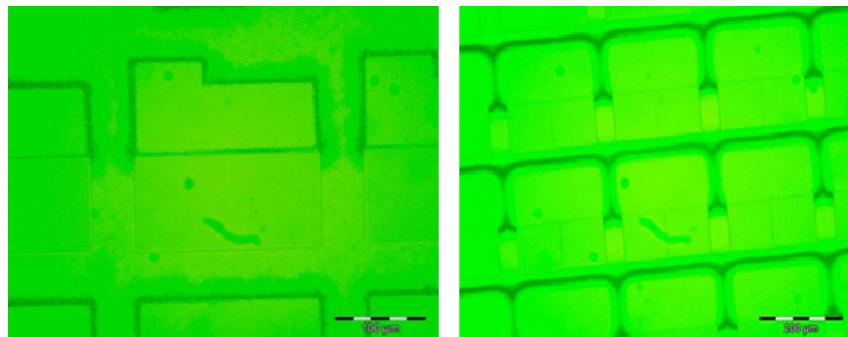


Abb. 33: Lichtmikroskopbilder, Wafer 02 und 03

Da der Wafer03 übergeätzt wurde, haben wir entschieden, dass es keine AL-Metallisierung bei ihm durchgeführt wird. Dagegen Wafer02 war in Ordnung, nur die Kanten waren unscharf(s. Abb. 33).

**Lack entfernen** Als letztes wurde der Lack von den Wafern 02 und 03 mit dem Aceton entfernt. Nach dem Lithographie-Schritt sieht unsere Struktur folgendermaßen aus (Abb. 34):



Abb. 34: Kontaktfenster geätzt und Lack entfernt

Anschließend wurden von allen drei Wafer die organische Stoffe mit dem Ätzmittel Caro's Etch entfernt.

## 1.4 Tag 3

### 1.4.1 PVD & Metallisieren :

PVD (physical vapour deposition) ist die physikalische Gasphasenabscheidung, die für die vakuumbasierten Beschichtung mit Aluminium verwendet wird.

Die Abbildung 35 zeigt die schematische Darstellung eines PVD-Verdampfungsverfahrens.

Das abzuscheidende Material (Target) liegt in fester Form vor. Mit dem Laser- oder Elektronenstrahl, der von einer Elektronenquelle geschoßt werden, werden die Ionen oder Elektronen durch ein elektromagnetisches System auf das Target umgelenkt und das Material wird verdampft. Das Material verdampft wegen des sehr niedrigen Druckes und der Energie der Elektronen. Es bildet sich ein Dampf, der durch elektrische Felder durch die Kammer geführt wird. Dabei trifft der Dampf auf die zu beschichtenden Teile und es kommt zu einer Schichtbildung. Die Elektronenstrahlkanonen setzen ein Vakuum voraus, deswegen wurde das Vakuum in der Bedampfungsanlage (s. Abb. 36) über die Nacht abgepumpt.

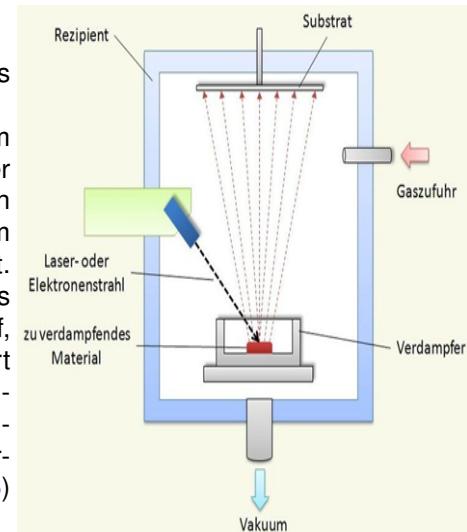


Abb. 35: PVD-Verfahren



Abb. 36: Bedampfungsanlage

Bevor der Wafer in die PVD-Anlage platziert wird, wurde die Waferoberfläche noch Mal mit einer 1%-igen HF-Lösung (HF-Dip) für 15 Sekunden gereinigt. Diese Lösung dient dazu, die neu entstandene Oxidschicht zu entfernen. Danach wurde unser einziger Wafer02 in den PVD-Apparat mit der Vorderseite nach unten eingelegt. Außer des Einlegens des Wafers wurden alle Schritte mit Hilfe der Steuertasten automatisch ausgeführt. Dann wird das Programm eingestellt und der PVD-Prozess fängt an. Die aufzusputternde Al-Schicht soll 500 nm betragen.

Da der PVD-Prozess 30 Minuten dauerte, wurden inzwischen Wafer 01 und 03 noch Mal mit Phosphorus beschichtet. Anschließend wurden die Wafer 30 Minuten lang mit 200 °C gebacken. Diese Improvisation war notwendig, da die beiden Wafer keine Oxidschicht mehr hatten. Nach PVD wurde Wafer02 mit einer Salpetersäure zehn Minuten lang behandelt. Anschließend backte der Wafer 30 Minuten lang bei einer Temperatur von 140 °C (da Al Kristalline bei 200 °C bildet).

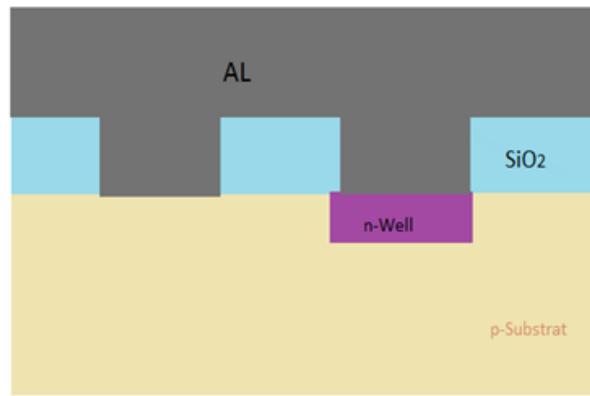


Abb. 37: Wafer02 nach der Metallisierung

**Wafer für den Schrägschliff brechen** Weiter wurden Wafer 01 und 03 für den Schrägschliffwinkel gebrochen. Die Wafer wurden zuerst in der Mitte angeritzt. Unter den Wafer an dieser angeritzten Stelle haben wir eine alte Probe gelegt und dann durch einen leichten Druck den Wafer zum Brechen gebracht. Es ist leicht durchzuführen, da Silizium entlang der Kristallrichtung bricht. Die entstandenen Proben haben die Abmessungen ca. 5x5 mm<sup>2</sup>. Die Proben wurden in den vormarkierten Kästchen gelegt.

### 1.4.2 Lithographie mit der AL-Maske

Nun werden die typischen Lithographie-Schritte bei leicht abgeänderten Bedingungen noch Mal durchgeführt.

## 1 DIE HERSTELLUNGSSCHRITTE

**Prebake, Belacken, Softbake** Die Flüssigkeitsreste werden entfernt, indem die Wafer 30 min. lang bei 140 °C auf der Heizplatte liegen bleiben.

Danach wird der Wafer 02 mit einem Lack Az 52/4 beschichtet und anschließend zwei Minuten lang bei 95 °C getrocknet. Die Ruhezeit beträgt eine Stunde.

**Belichten mit Al-Maske** Der Wafer 02 wird genau so belichtet, wie oben schon beschrieben wurde (s. Lithographie am Tag2), (s. Abb. 38) Bemerkung: Die Al-Maske wurde auch nach AA-Maske justiert, und die Belichtungszeit beträgt jetzt nur 3,7 Sekunden, da Aluminium glänzend ist und Licht reflektiert. Danach wurde der Lack mit der Rohm Haas-Lösung entwickelt (Abb. 39).

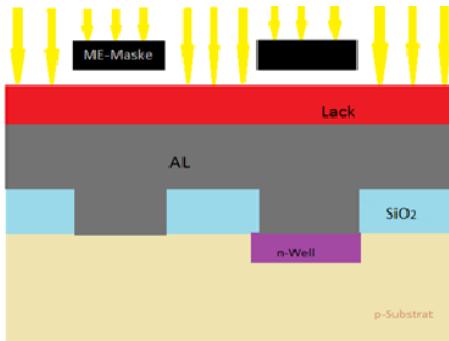


Abb. 38: Belichten durch die ME-Maske

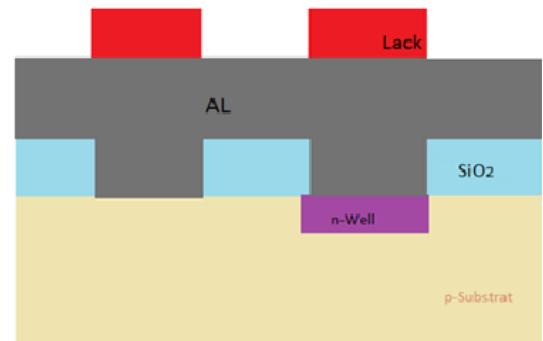


Abb. 39: Struktur nach dem Entwickeln

**Sichtkontrolle** Nun soll der Wafer mit dem Lichtmikroskop untersucht werden. Wenn der Lack nicht bis zum Ende entwickelt wurde, kann man die Lichtinterferenz sehen, was wir auch in den kleinen Mengen gesehen haben.

Dektak-Messung ergab, dass die Dicke nur 1,36 μm ist, aber wir brauchen mindestens 1,5 μm. Deswegen wurde entschieden, noch Mal zehn Sekunden lang Nachentwicklung zu machen. Nächste Messung ergab 1,35 μm. Danach wurde der Wafer noch mit dem Photometer untersucht und es sprach nichts dagegen, dass der Lack nicht entwickelt wurde.

**Ätzen** Vor dem Ätzen wird der Wafer noch für fünf Minuten lang auf die Heizplatte bei 140 °C gelegt. Der Ätzvorgang wird diesmal mit einer Ätzmischung aus der Phosphorsäure, Essigsäure, Wasser und der Salpetersäure durchgeführt ( $H_3PO_4 + H_2O + HNO_3$ ). Es wurde mehrmals in der Zehner-Intervall (je zehn Sekunden in der Lösung) geätzt, danach wurde schnell in das Di-Wasser eingetaucht und abgespült. Nach der Sicht wurde beurteilt, ob die Al-Schicht weggeätzt wurde (Abb. 40). Beobachtung: viel Bläschen.

## 1 DIE HERSTELLUNGSSCHRITTE

---



Abb. 40: Al-Schicht ätzen

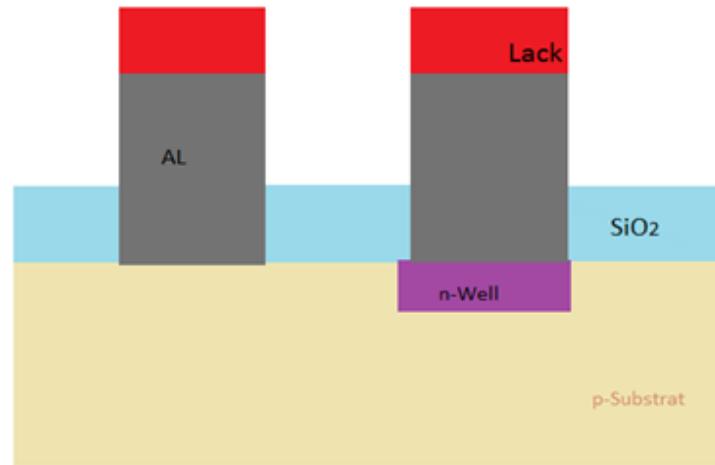


Abb. 41: Struktur nach dem Ätzvorgang

**Kontrolle mit dem Lichtmikroskop** Die Untersuchung mit dem Lichtmikroskop hat uns gute Bilder geliefert: Die Kontakte sehen gut aus, nur ein wenig untergeätzt (dunkler Rand, s. Abb. 42).

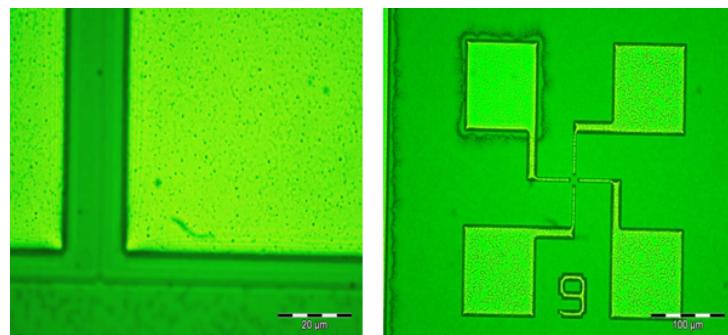


Abb. 42: Lichtmikroskopbilder

**Photolack entfernen** Als letzter Schritt wird der Lack entfernt. Diesmal wird er in das Aceton für drei Minuten eingetaucht, danach sehr schnell mit Wasser gesäubert. Anschließend wurde unser Wafer in einem Ultraschalbad gereinigt (Abb. 43).



Abb. 43: Ultraschalbad

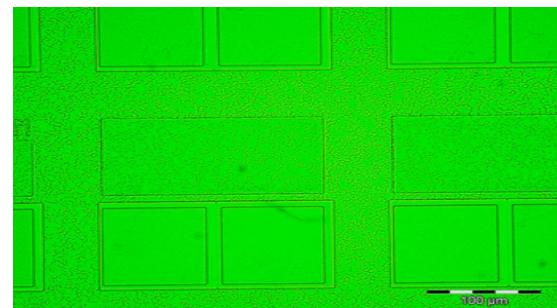


Abb. 44: Lichtmikroskopbild: Endstruktur

Am Ende haben wir unseren Wafer noch Mal am Lichtmikroskop untersucht. Die Ergebnisse waren gut: Kanten sind sehr glatt, sehr gute, klare Struktur (s. Abb. 44).

**Enddickenmessung** Die Aluminiumdickenmessung mit dem Profilometer ergab die Werte zwischen 470 nm und 490 nm, was dem theoretisch erwarteten Wert von 500 nm entsprach.

**Tempern** Dieser Temperaturprozess dient der Verbesserung der Kontakte zwischen dem Aluminium und dem Substrat. Dafür wurde der Wafer bei 400 °C für 30 Minuten im Ofen erhitzt.

### 1.4.3 Endergebnis

Unser Endergebnis, also ein pn-Übergang, ist schematisch in der Abbildung 45 dargestellt.

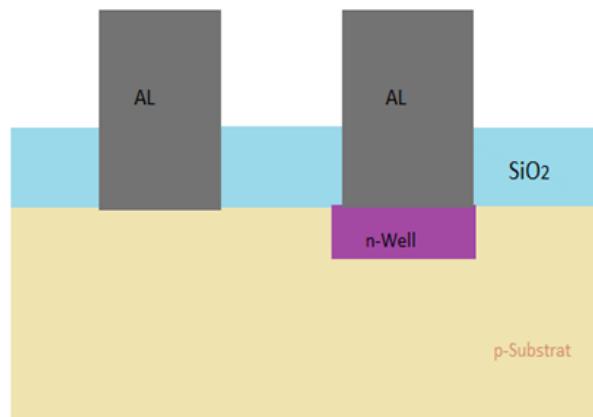


Abb. 45: Endstruktur

Endergebnis: Wafer 120502

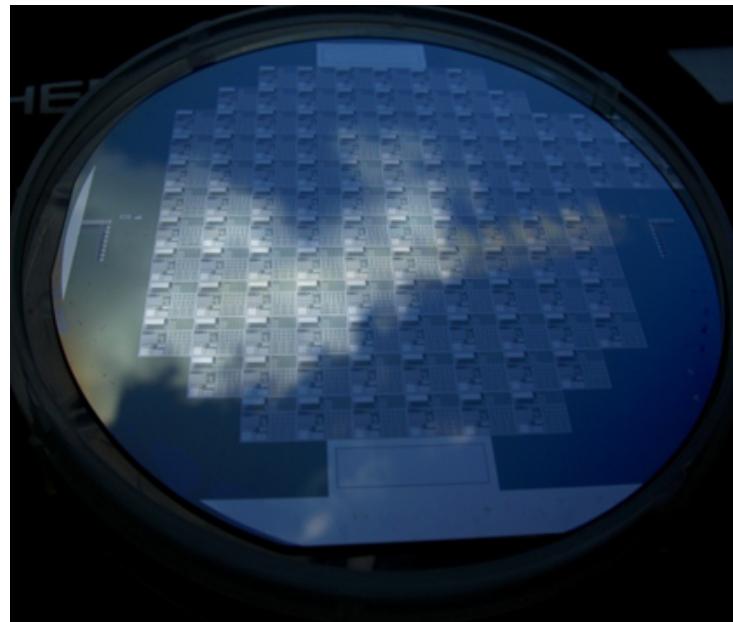


Abb. 46: Endergebnis: Wafer 120502

### 1.5 Tag 4

#### 1.5.1 Schrägschliff

Um die pn-Übergangstiefe zu messen wurden unsere Proben zuerst geschliffen (weil die pn-Tiefe nicht direkt mit dem Mikroskop gemessen werden kann). Jede Probe wird zuerst auf einen Support geklebt, indem man den Support auf einer Heizplatte bei 120°C heizt und der spezielle Klebstoff darauf geschmolzen wird (s.Abb. 47 und 48 ).



Abb. 47: Klebstoff mit Proben



Abb. 48: Zubereitung zum Schleifen

Die Proben werden dann mit einem Schleifmittel (Suspension DP aus Diamantpartikeln) fünf Minuten lang geschliffen(s. Abb. 49 ), so dass sie am Rand einen Schrägschliff (s.Abb. 50) bekommen. Danach werden die Proben abgespült und getrocknet.



Abb. 49: Schleifen



Abb. 50: Schrägschliff

### 1.5.2 Dekoration

Zuerst wurde mit der  $HF : CH_3COOH : HNO_3$  (1:4:5) Lösung versucht, die Probe zu dekorieren. Es hat nicht funktioniert und deswegen wurde entschlossen, mit der Verkupferung zu versuchen.

Die Dekoration der Proben wird dann im Reinraum mit einer Lösung aus zwei Gramm  $CuSO_4$ , fünf ml HF(40%) und 100 ml  $H_2O$  dekoriert. Am Anfang des Vorgangs liegen die Proben in der Lösung mit der Vorderseite nach oben(Abb. 51). Sie werden dann mit zwei "Schwanenhals"-Lampen drei bis fünf Sekunden belichtet, damit das Licht den Prozess aktivieren kann (Abb. 52).



Abb. 51: Verkupferung



Abb. 52: Schwanenhalslampen

Die Kupferlösung wird auf der Oberfläche der Probe an dem angeschliffenen Gebiet aufgetragen. Da die Kupfermischung einen Mangel an den Elektronen hat, lagert sich diese Lösung an dem n-Gebiet, wo es mehr Elektronen gibt. Deswegen erscheint die n-leitende Seite des pn-Übergangs heller getönt als die p-leitende Seite (s.Abb. 53). Anschließend werden die Proben mit dem Aceton gereinigt.

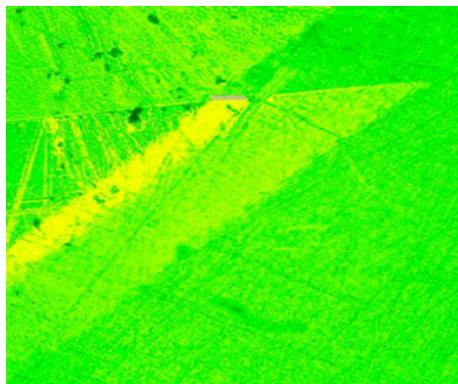


Abb. 53: Dekoration unter dem Lichtmikroskop

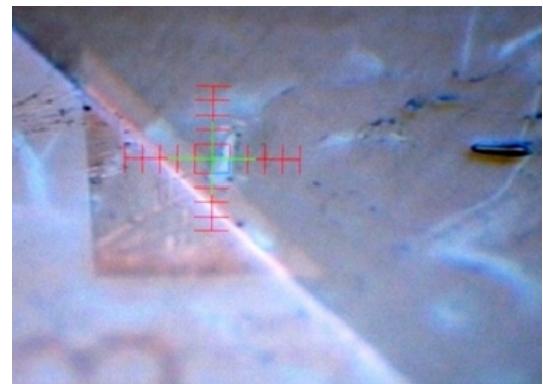


Abb. 54: pn-Tiefemessung mit dem Dektak

### 1.5.3 Auswertung der Junction Tiefe

Unter dem Mikroskop ist dieser Unterschied gut sichtbar und lässt sich ohne Schwierigkeiten auswerten (es wird die Länge der Verkupferung I gemessen, s. Abb. 55):

Wafer01\_a:  $80 \mu\text{m}$   
 Wafer01\_b:  $75 \mu\text{m}$

Dektak-Messung:

Wafer01\_b:

Tiefe  $7,0 \mu\text{m}$ , Länge  $300 \mu\text{m}$   
 Tiefe  $6,9 \mu\text{m}$ , Länge  $300 \mu\text{m}$

Wafer01\_a:

Tiefe  $6,2 \mu\text{m}$ , Länge  $300 \mu\text{m}$   
 Tiefe  $5,7 \mu\text{m}$ , Länge  $300 \mu\text{m}$

Daraus kann man die Junctions-Tiefe ausrechnen:

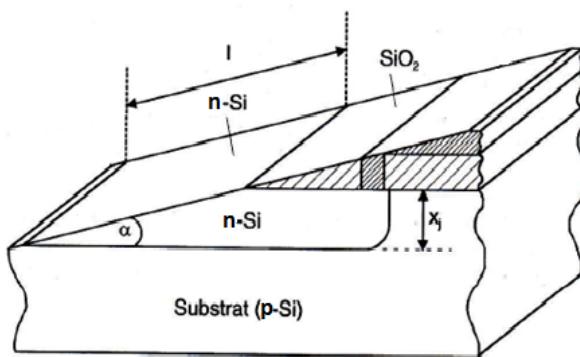


Abb. 55: Schematische Darstellung zum Ausrechnen der pn-Tiefe

Nach der Beziehung  $x_j = \sin \alpha$ , haben wir folgende Ergebnisse ausgerechnet:

Wafer01\_b:

$1,52 \mu\text{m}$  und  $1,65 \mu\text{m}$

Wafer01\_a:

$1,76 \mu\text{m}$  und  $1,70 \mu\text{m}$

Die ausgerechneten Werte entsprechen unseren Erwartungen, was ein Indiz dafür ist, dass die Prozessschritte richtig gemacht wurden.

So endet unser Praktikum im Reinraum.

## 1.6 Schlussbetrachtung

Als Ergebnis unserer Tätigkeit haben wir nur einen Wafer mit vielen pn-Übergängen angefertigt. Die anderen Wafer haben wir für den Schrägschliff verwendet.

Insgesamt haben alle Teilnehmer durch diese vier Tage im Reinraumlabor viel Wissen über die Arbeit im Reinraum, den Umgang mit gefährlichen Stoffen, Arbeit am Mikroskop und Profilometer, und die

## 1 DIE HERSTELLUNGSSCHRITTE

---

Herstellungsprozesse eines pn-Übergangs erworben. Praktische Arbeit hat unser theoretisches Wissen sehr bereichert.



Abb. 56: Laborteilnehmer und Betreuer in  
Reinraumkleidung

## 2 Kennlinie

### 2.1 Messaufbau

Die erste Untersuchung, der wir unsere 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-Analyser 4145A von HP verbunden, der einen sweep der Spannung von  $-1\text{ V}$  bis  $1\text{ V}$  macht und dabei den Strom misst.

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

### 2.2 Auswahl der zu messenden Diode

Um möglichst aussagekräftige Messwerte zu erhalten, 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 einigen weiteren Überlegungen stellte sich jedoch 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 Fläche des pn-Übergangs an. Daher kann eine der Fläche nach nur halb so große Diode, mit verzahnter Fingerstruktur, 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.

### 2.3 Erwartete Kennlinie

#### 2.3.1 Dunkelkennlinie

Bei intakten Dioden erwarten wir im Grunde eine Kennlinie nach der Formel von Shockley (Gl. 1) jedoch inklusive realitätsbedingter Abweichungen.

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

Wie in Abb. 57 logarithmisch dargestellt erwarten wir, dass nur der mittlere Teil zwischen  $0,2\text{ V}$  und  $0,5\text{ V}$  der Shockley-Gleichung folgt. Bei höheren Spannungen ist der Widerstand der Bahngebiete nicht mehr vernachlässigbar klein und wirkt sich deutlich strommindernd auf die Kennlinie aus. Außerdem wird sich durch die Nichteinhaltung der Shockleybedingungen die Rekombination in der Raumladungszone bemerkbar machen. Bei kleinen Spannungen (unter ca.  $0,2\text{ V}$ ) fließt deutlich mehr Strom aufgrund von Rekombination als durch den Potentialunterschied, wodurch der mehr Strom fließt als nach Gl. 1.

Die in Abb. 57 dargestellte mangelhafte Messgenauigkeit haben wir nicht erwartet. Wir sind davon ausgegangen, dass selbst bei sehr guten

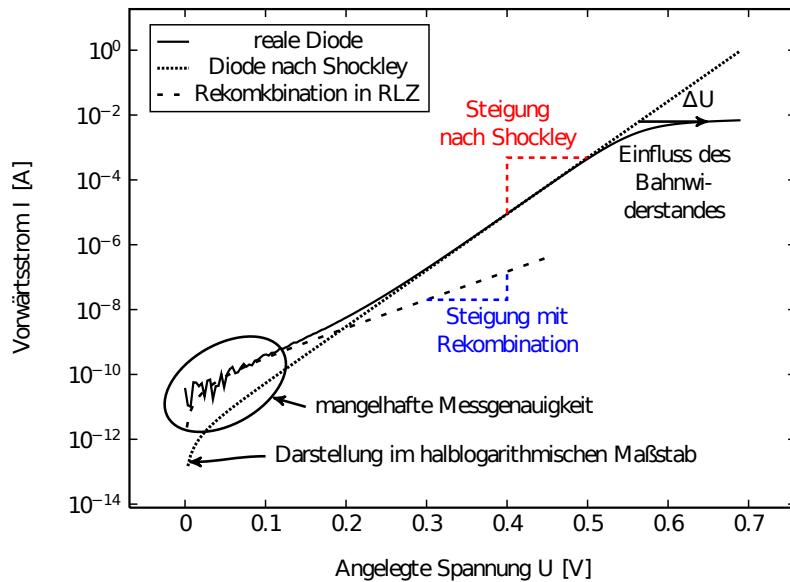


Abb. 57: Reale kennlinie einer Diode

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

Dioden, also in diesem Fall welchen mit sehr kleinen Sperrströmen, der Parameter-Analyser keine Probleme hat diese zu messen.

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

### 2.3.2 Beleuchtete Kennlinie

Unter Lichteinfluss ist die theoretische Kennlinie einer Diode wie folgt:

$$\begin{aligned} J_{ges} &= J_0 \cdot (e^{\frac{U}{U_t}} - 1) - J_{ph} \\ J_{ph} &= g \cdot e \cdot (L_n + L_p) \end{aligned} \quad (2)$$

Wir erwarten also insgesamt kleinere Durchlassströme und damit eine größere Durchlassspannung. Außerdem müsste der Sperrstrom durch die zusätzliche Generation größer werden.

## 2.4 Messergebnisse

### 2.4.1 Dunkelkennlinie

Die ersten Messungen haben wir mit folgendem Ergebnis unter Einfluss des Raumlichtes durchgeführt:

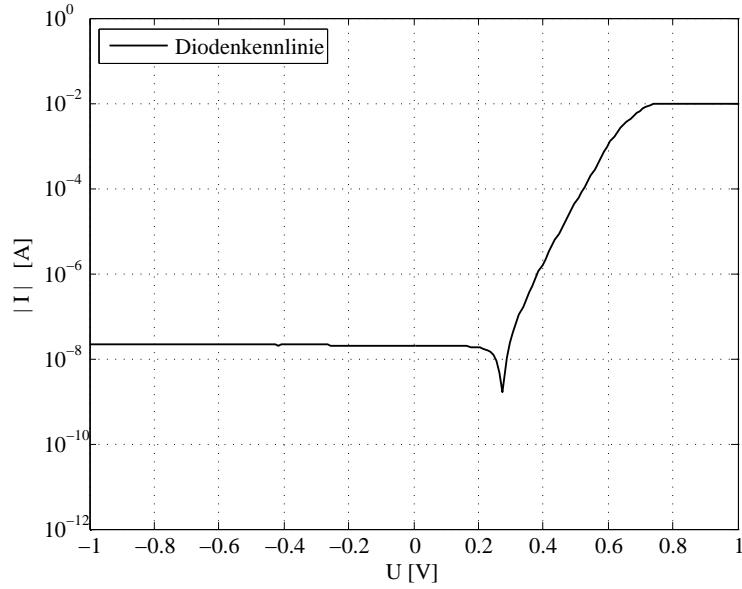


Abb. 58: Diodenkennlinie unter Raumlichteinfluss

Wie in Abb. 58 gut zu erkennen, ist der Einfluss des Raumlichtes groß genug um die Durchlassspannung auf fast  $0,3\text{ V}$  zu heben. Da das Raumlicht sich offensichtlich so gravierend auf die Kennlinie auswirkt haben wir den Messaufbau für alle folgenden Messungen abgedunkelt. Außerdem war die Strombegrenzung zu gering eingestellt. Auch das ist in den weiteren Messungen korrigiert.

Die folgenden Messungen stammen aus der mittleren Spalte Dies ganz oben, in der Mitte und ganz unten.

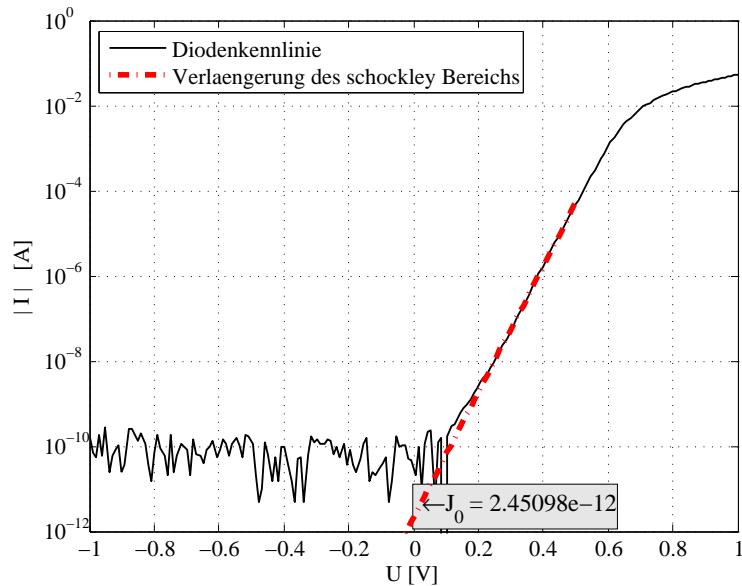


Abb. 59: Dunkelkennlinie der großen Diode auf dem  
Die z1s6

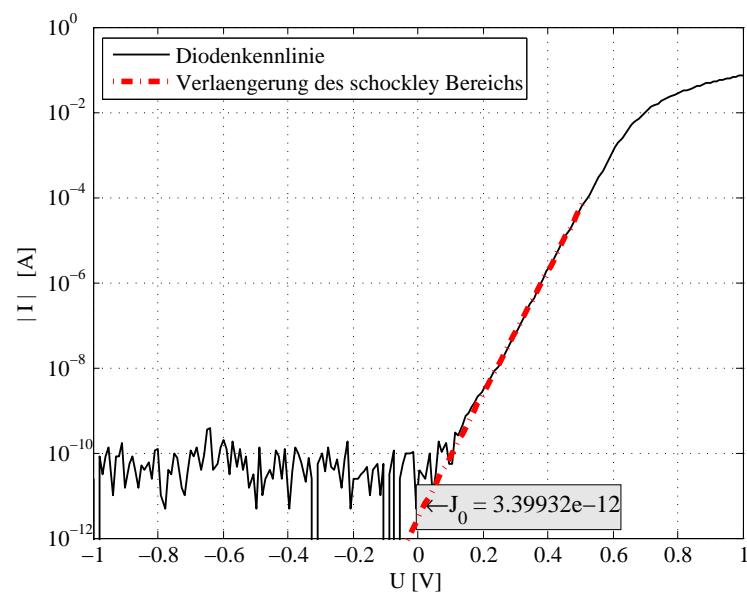


Abb. 60: Dunkelkennlinie der großen Diode auf dem  
Die z6s6

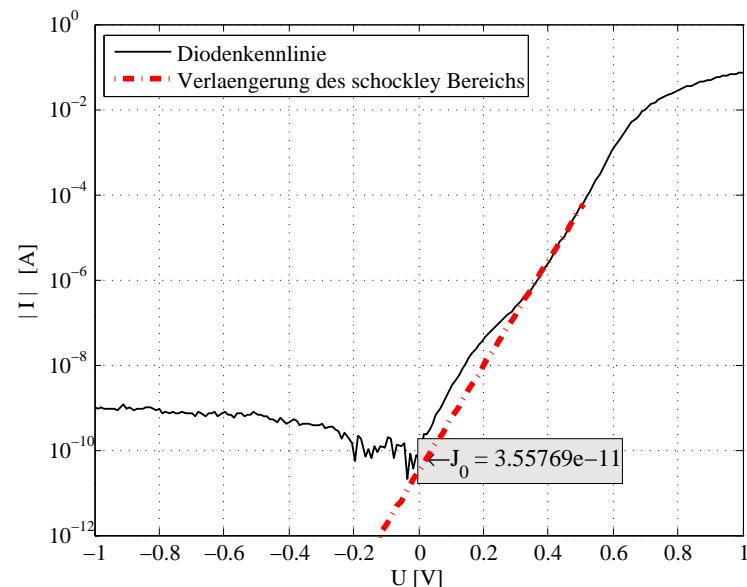


Abb. 61: Dunkelkennlinie der großen Diode auf dem  
Die z12s6

Zum Vergleich noch die Messung der Fingerstruktur.

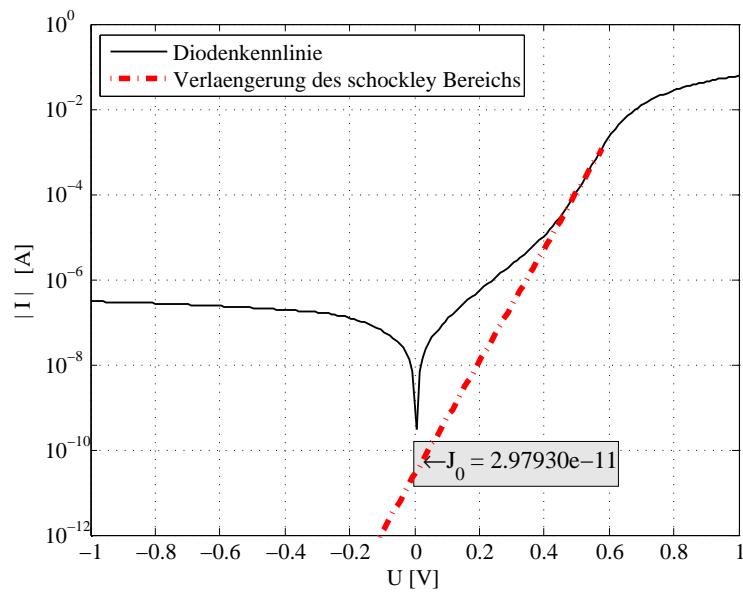


Abb. 62: Dunkelkennlinie der großen Diode mit Fingerstruktur auf dem Die z6s6

#### 2.4.2 Beleuchtete Kennlinie

Um die beleuchtete Kennlinie auf zu nehmen haben wir die Lichtquelle des Microskops während der Messung einer großen Diode angeschaltet gelassen.

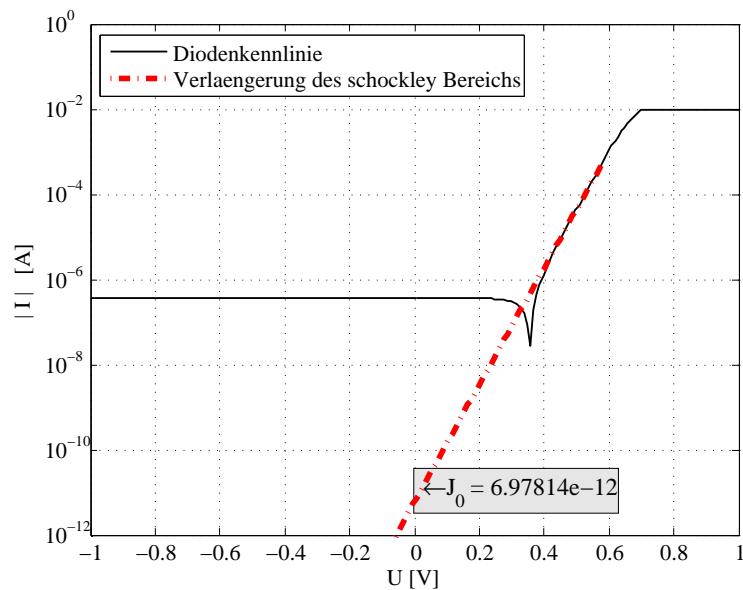


Abb. 63: Kennlinie der beleuchteten Diode auf dem Die z6s6

## 2.5 Auswertung

Zuerst einmal scheinen fast alle der gemessenen Dioden zu funktionieren, sich also wie erwartet zu verhalten. Wir haben die Prozessschritte bei der Herstellung also insofern erfolgreich durchgeführt, als dass auf dem Wafer funktionsfähige Dioden entstanden sind.

Entgegen unserer ursprünglichen Vermutung war der Parameter-Analyzer nicht in der Lage die kleinsten Ströme, die wir hätten messen wollen, auf zu zeichnen. Dies ist deutlich im linken Teil der Abbildungen 59 und 60 zu erkennen. Hier konnte unser Messgerät die Sperrspannung der Diode nicht mehr aufzeichnen, was jedoch für den von uns hergestellten pn-Übergang spricht. Die Sperrspannung beträgt bei den oben genannten Messungen unter  $0,1 \text{ nA}$ , wobei  $J_0 \approx 3 \text{ pA}$  ist und der Durchlassstrom bei ca.  $100 \text{ mA}$  liegt.

Diese Werte lassen sich nur schwer mit z.B. handelsüblichen Dioden vergleichen, da von den Herstellern keine Angaben etwa zu Dotierstoffkonzentration und pn-Übergangsfläche gemacht werden. Bei Sperrströmen unter  $0,1 \text{ nA}$  kann man aber davon ausgehen, dass sie digital als Null interpretiert werden, da sie selbst von dem Parameter-Analyzer nicht mehr als eindeutiger Strom aufgefasst werden. Damit könnte man unsere Dioden durchaus in digitalen Schaltungen einsetzen und hätte nur sehr geringe Leckströme.

Beim Prozessieren der Diode auf dem Die z12s6 (Abb. 61) scheint etwas schief gegangen zu sein. Es ist zwar deutlich zu sehen, dass es eine Diodenkennlinie ist, der Sperrstrom von  $1 \text{ nA}$  ist aber deutlich größer als bei den anderen Dioden.

Bei dem Kennlinienplot der Fingerstruktur (Abb. 62) ist deutlich zu erkennen, dass der Sperrstrom auf über  $0,1 \mu\text{A}$  gestiegen ist. Auch  $J_0$  ist aufgrund der größeren pn-Übergangsfläche auf  $30 \text{ pA}$  gestiegen.

Abschließend verhielt sich auch die beleuchtete Diode exakt wie erwartet. Im Vergleich zur unbeleuchteten Diode sind Sperrstrom und Durchlassspannung deutlich größer wobei  $J_0$  in der selben Größenordnung bleibt.

## 3 Schaltverhalten

### 3.1 Einführung

In diesem Versuch soll das Schaltverhalten bei Strom- und Spannungssprüngen untersucht werden. Ein Maß für die Geschwindigkeit mit der die Diode schalten kann ist die Minoritätsträgerlebensdauer. Der Schaltvorgang hält an, bis die Minoritäten auf- bzw. abgebaut sind. Daher ist es Ziel dieses Versuches über zwei unterschiedliche Verfahren diese Ladungsträgerlebensdauer zu bestimmen. Dies ist zum einen der Ausschaltvorgang und zum anderen die Stromkommutierung.

### 3.2 Theorie

Zunächst sollen das ideale und das reale Schaltverhalten gegenüber gestellt werden. Das ideale Verhalten charakterisiert sich durch verzögerungs- und verlustfreies Schalten. Die zu messenden Dioden zeigen allerdings durch Energiespeicher wie die Sperrsicht- und die Diffusionskapazität kein ideales Schaltverhalten.

Dabei ist die Charakteristik des Schaltverhaltens davon abhängig, ob es sich um ein Spannungs- oder Stromsprung und einen Ein- oder Ausschaltvorgang handelt. Um das Verständnis für diese Vorgänge zu verbessern, soll im Folgenden näher auf einige Beispiele eingegangen werden.

Bei einem Einschaltstromsprung werden zwei Fälle unterschieden: Die starke und die schwache Injektion. Ob starke oder schwache Injektion vorliegt richtet sich nach der Ladungsträgeranzahl, die von der einen Seite des pn-Überganges als Majoritätsträger auf die andere Seite als Minoritätsträger gelangen. Ist die Anzahl der auf der anderen Seite ankommenden (nun Minoritäten) in etwa so groß, oder größer wie die Majoritäten spricht man von starker Injektion. Andernfalls spricht man von schwacher Injektion.

Wie in Bild 64 zu erkennen, hat in den beiden Fällen der Bahnwiderstand eine unterschiedlichen Einfluss. Nach Shockley ist der Bahnspannungsabfall für schwache Injektion zu vernachlässigen. Mit Hilfe der Boltzmanfaktoren lässt sich ein logarithmischer Verlauf der Spannung über der RLZ herleiten. Dieser ist in der Abbildung 64 in der grob gestrichelten Kennlinie zu erkennen. Man könnte vermuten, dass ohne den Bahnwiderstand nur der kapazitive Anteil zur Wirkung kommt und die Spannung daher kaum springen darf.

Kommt hingegen der Einfluss des Bahnwiderstandes bei der starken Injektion hinzu, dann kann ein heftiger Spannungssprung erfolgen. Der zusammengefasste Spanningsverlauf ist in Bild 64 an der durchgezogenen Kennlinie zu erkennen. Durch den Bahnwiderstand bekommt die Diode vergleichbar mit Zuleitungen einen induktiven Charakter und die Spannung kann springen.

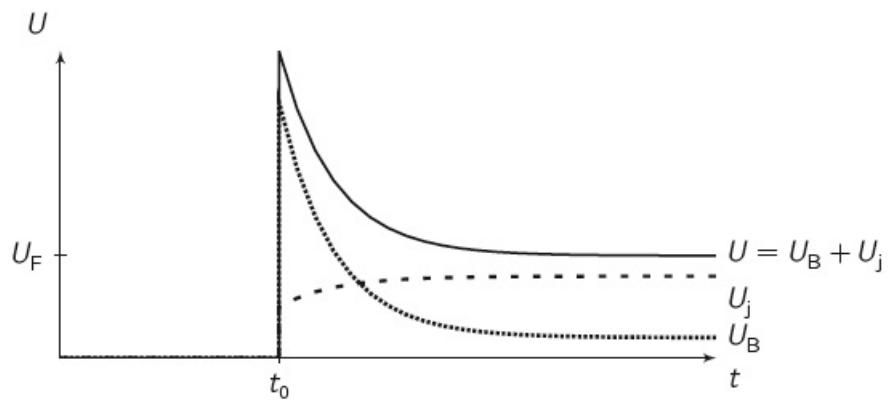


Abb. 64: Spannungs- und Stromverlauf beim Stromeinschaltsprung

Quelle: Prof. Boit, Clemens Helfmeier, Philipp Scholz: Laborskript Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik (SS 2012), S. 78

Bei der Stromabschaltung erhält man idealer Weise den Spannungs- und Stromverlauf in Abb. 65.

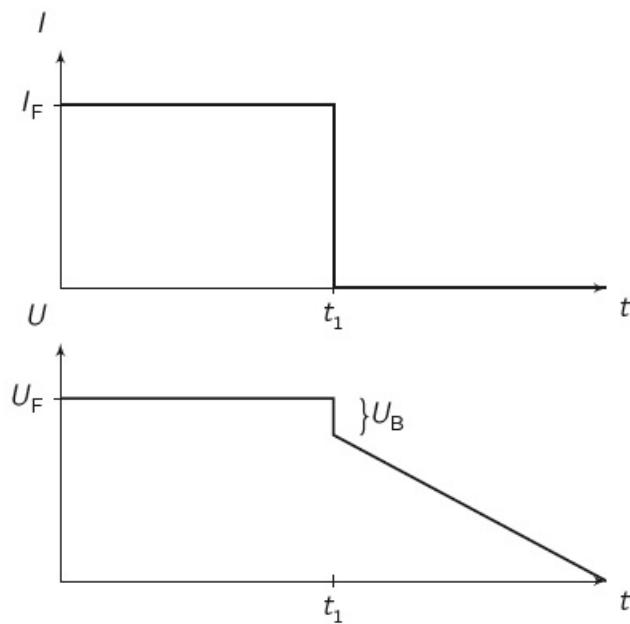


Abb. 65: Spannungs- und Stromverlauf beim Stromausschaltsprung

Quelle: Prof. Boit, Clemens Helfmeier, Philipp Scholz: Laborskript Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik (SS 2012), S. 80

In Abb. 65 kann man im Spannungsgraph erkennen, dass zum Schaltzeitpunkt die Spannung sprungartig auf einen bestimmten Wert abfällt. Dies ist mit den wegfallenden Bahnwiderständen zu begründen. Über diesen Spannungsabfall kann der Bahnwiderstand bestimmen werden, wenn man den Eingangsstrom gemessen hat.

Der kontinuierliche Spannungsabfall im Anschluss lässt sich über die Bilanzgleichung 3 herleiten.

$$\frac{\delta p}{\delta t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{j}_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (3)$$

Da die Stromdichte in der Divergenz zum Zeitpunkt des Abschaltens an der Stelle  $w_n$  zu null gezwungen wird, sich die restlichen Ladungsträger durch Rekombination abbauen und damit die Divergenz der Stromdichte ebenfalls null wird, ergibt sich eine Differenzialgleichung mit der Lösung aus Formel 4, wenn man von lin. Proportionalität zwischen  $Q_s$  und  $p$  in Gleichung 5 ausgeht.

$$Q_s(t) = Q_{s0} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (4)$$

$$Q_s = q A L_p p_n(w_n) \quad (5)$$

Aus dieser Proportionalität und der Boltzmannbeziehung ergibt sich die Gleichung 6.

$$p_n(w_n, t) = p_{n0} \exp\left(\frac{U_F}{U_T}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (6)$$

Wenn man zuletzt noch den umgestellten Boltzmannfaktor aus Gleichung 7 in Gleichung 6 einsetzt, erhält man Gleichung 8, welche einer Geradengleichung entspricht und aus der die Minoritätsträgerlebensdauer ermittelt werden kann.

$$U_j = U_T \ln\left(\frac{p(w_n)}{p_{n0}}\right) \quad (7)$$

$$U(t) = U_F - U_T \frac{t}{\tau} \quad (8)$$

Zusätzlich zu diesem Verfahren kann man die Minoritätsträgerlebensdauer auch über die Speicherzeit bei der Stromkommunitierung gewinnen. Die Stromkommunitierung ist ein Verfahren, bei dem wie in Abb. 66 zwei entgegengesetzt gepolte Stromquellen parallel über einen Schalter zu einer Diode geschaltet werden.

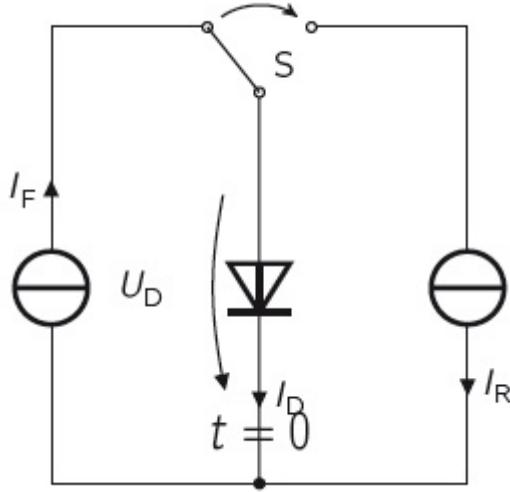


Abb. 66: Spannungs- und Stromverlauf bei

Quelle: Prof. Boit, Clemens Helfmeier, Philipp Scholz: Laborskript Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik (SS 2012), S. 81

Die Diode wird also abwechselnd in Sperr- und in Durchlassrichtung betrieben. Um die Minoritätsträgerlebensdauer ermitteln zu können wird in diesem Fall die Bilanzgleichung zeitabhängig betrachtet (Formel 9). Hierbei wird die Divergenz in der Bilanzgleichung nicht null und es ergibt sich ein zusätzlicher Term.

$$\frac{\delta Q_s}{\delta t} = -\frac{Q_s}{\tau} + I \quad (9)$$

Wie bei der Stromabschaltung erhält man einen Lösungsansatz wie in Gleichung 10.

$$Q_s(t) = I_F \tau \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - I_{R0} \tau \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad (10)$$

Man weiß, dass sich die Speicherladung zum Zeitpunkt  $t_s$  abgebaut hat und somit null ist. Dies kann man in die Gleichung einsetzen und nach  $\tau$  umstellen und erhält die Gleichung 11.

$$\tau = \frac{t_s}{\ln\left(1 + \frac{I_F}{I_{R0}}\right)} \quad (11)$$

Das Stromverhältnis kann man nun selber einstellen und die Speicherzeit kann aus dem Spannungsverlauf gewonnen werden, der annähernd wie der in Abb. 67 aussehen sollte.

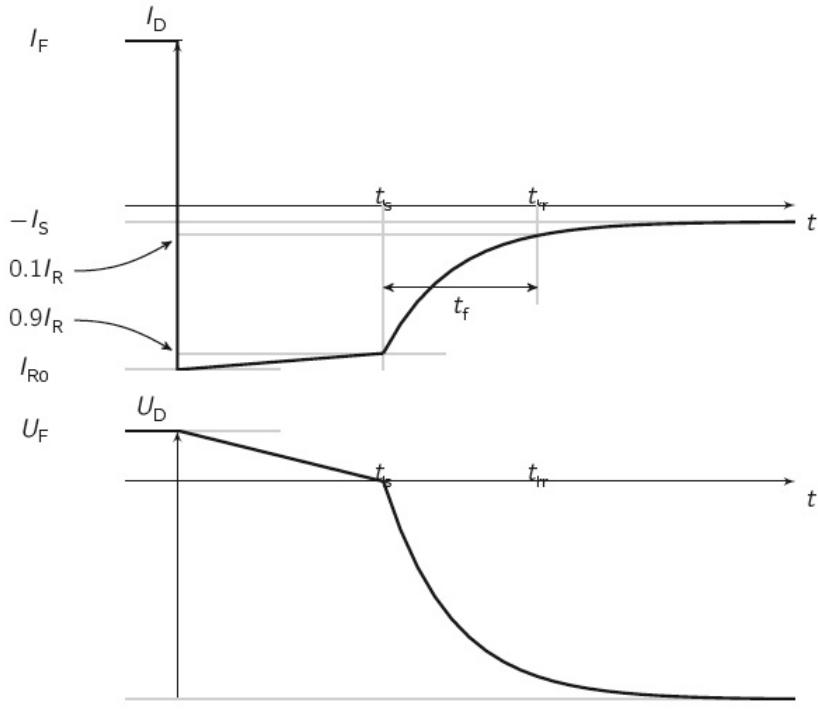


Abb. 67: Spannungs- und Stromverlauf bei Stromkommutierung

Quelle: Prof. Boit, Clemens Helfmeier, Philipp Scholz: Laborskript Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik (SS 2012), S. 82

Der kontinuierliche Abfall bis zum Zeitpunkt  $t_s$  ergibt sich wie bei der Stromabschaltung durch das Ausräumen der in den Bahngebieten noch gespeicherten Minoritäten. Wenn diese ausgeräumt sind erreicht sowohl der Strom den Sperrsättigungsstrom als auch die Spannung die Sperrspannung durch einen exponentiellen Abfall.

Um in diesem Fall den Lösungsansatz für die Differenzialgleichung zu erhalten, ist man davon ausgegangen, dass die Gleichung 12 gilt.

$$Q_s = I_F \tau \quad (12)$$

Um diese Gleichung zu ermitteln, bedient man sich zuerst der beiden Gleichungen 13 und 14.

$$Q_s = eA \int_{w_n}^{\infty} (p_n(x) - p_{n0}) dt \quad (13)$$

$$(p_n(x) - p_{n0}) = p_{n0} \left( \exp\left(\frac{q}{kT} U_{pn}\right) - 1 \right) \exp\left(-\frac{x - w_n}{L_p}\right) \quad (14)$$

Man setzt 14 in 13 ein und erhält Gleichung 15.

$$Q_s = eAL_p p_{n0} \left( \exp\left(\frac{q}{kT} U_{pn}\right) - 1 \right) \quad (15)$$

Als nächstes nutzt man die Formel 16

$$U_T = \frac{kT}{q} \quad (16)$$

und die Formel 17 (entnommen aus dem Laborskript Formel 3.56).

$$j_{p,Diff}(w_n) = p_{n0} \frac{eD_p}{L_p} \left( \exp\left(\frac{U_{pn}}{U_T}\right) - 1 \right) \quad (17)$$

Formel 17 darf man benutzen, da man davon ausgegangen ist, dass nur die Diffusionsströme betrachtet werden (Weil die Ströme von der einen Seite des pn-Übergangs als Feldströme fließen und auf der anderen Seite mit der selben Größe in Diffusionsströme übergehen. Des weiteren wird eine p+n-Diode berachtet, sodass die Diffusionsströme auf der n-Seite vernachlässigt werden können.)

Damit erhält man die Gleichung 18.

$$Q_s = A \frac{L_p^2}{D_p} j_n(w_n) \quad (18)$$

mit den Gleichungen 19 und 20

$$I = jA \quad (19)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (20)$$

erhält man die gesuchte Gleichung 12.

Ein Effekt, den man beobachten kann, wenn die Diode in Sperrrichtung betrieben wird, ist die sogenannte Sperrsichtatmung. Dabei wird die Diode in Sperrrichtung betrieben. Legt man nun unterschiedliche Sperrspannungen an, kann man unterschiedliche Weiten der Raumladungszone feststellen. Umso größer die Sperrspannung wird, desto größer wird auch die Raumladungszonenweite. Dies ist an der Formel 21 zu erkennen.

$$w_{RLZ} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{e} \left( \frac{N_A + N_B}{N_A \cdot N_B} \right) (U_D - U)} \quad (21)$$

### 3.3 Durchführung und Auswertung

Um die beiden Verfahren Stromkommutierung und Stromabschaltung umzusetzen, kann man die Schaltung in Abb. 69 nutzen.

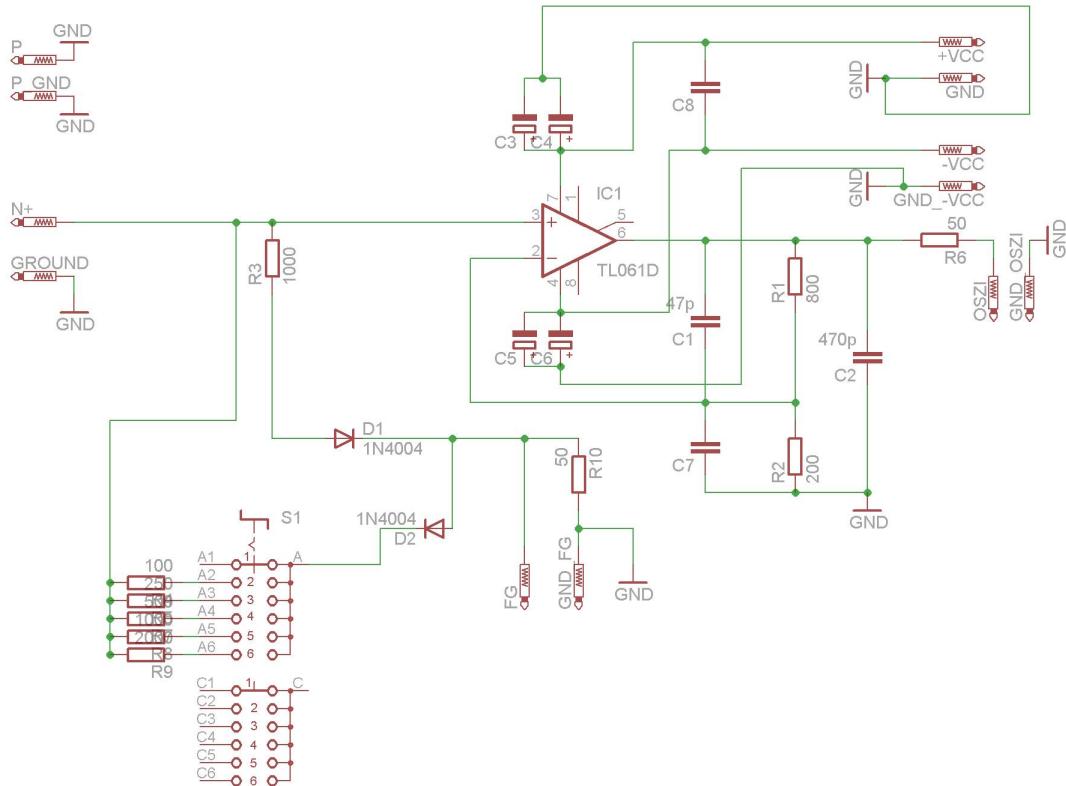


Abb. 68: Schaltung

Quelle: Schaltung von Michael Sadowski und Clemens Helfmeier

Sinn der Schaltung ist vor allen Dingen die sehr geringen Kapazitäten der Diode messen zu können und damit auf die Schaltzeiten zu schließen. Dazu wird ein Operationsverstärker mit einer sehr geringen Eingangskapazität verwendet. Würde man das Oszilloskop, welches eine Eingangskapazität im Bereich von 13 pF hat, direkt davor schalten, könnte man die Kapazität der Diode (im Bereich von 1 pF) nicht fehlerfrei ermitteln und damit auch nicht die Minoritätsträgerlebensdauer. Im Labor wurde der nicht invertierende Verstärker mit einer Spannungsverstärkung von 1 genutzt. Die Kapazitäten am Ausgang dienen der Spannungsstabilisierung und der 50 Ohm Widerstand der Anpassung.

Auf der linken Seite wird an dem Anschluss N+ und der Masse die Diode angeschlossen. Die Diode wird mit den Messnadeln kontaktiert und der gesamte Messplatz wird mit der Verdunkelungshaube abgedunkelt. Am Eingang FG wird eine Rechtecksignal von -5 V bis 5 V mit Hilfe des Funktionsgenerators angelegt. Es gibt nun zwei Fälle, die eintreten. Ist die Spannung negativ, kann nur die Diode D1 leiten. Da aber der High-Anschluss am N+ Gebiet anliegt, ist die Diode trotz negativer Spannung in Sperrrichtung gepolt. Mit der Diode D2 verhält es sich genau umgekehrt.

Diese Schaltung befindet sich in der silbernen Box am linken Bildrand.

Es gibt nun die Möglichkeit mit Hilfe eines Drehstellers (schwarzer Steller auf der silbernen Box, links) zwischen einem Leerlauf, der für die Stromabschaltung (also Rückwärtsspannung null) und unterschiedlich großen Widerständen für unterschiedlich große Rückwärtsströme für die Stromkommutierung zu schalten. Zum Messaufbau gehören weiterhin ein Oszilloskop um die Spannungswerte aufzunehmen (mit integrierter USB-Speicherfunktion), eine Gleichspannungsquelle um die Betriebsspannung des OPV zu liefern und der Funktionsgenerator um das Rechtecksignals zu erzeugen. Dabei lässt man sich die Spannung über der Diode und das Rechtecksignal anzeigen.

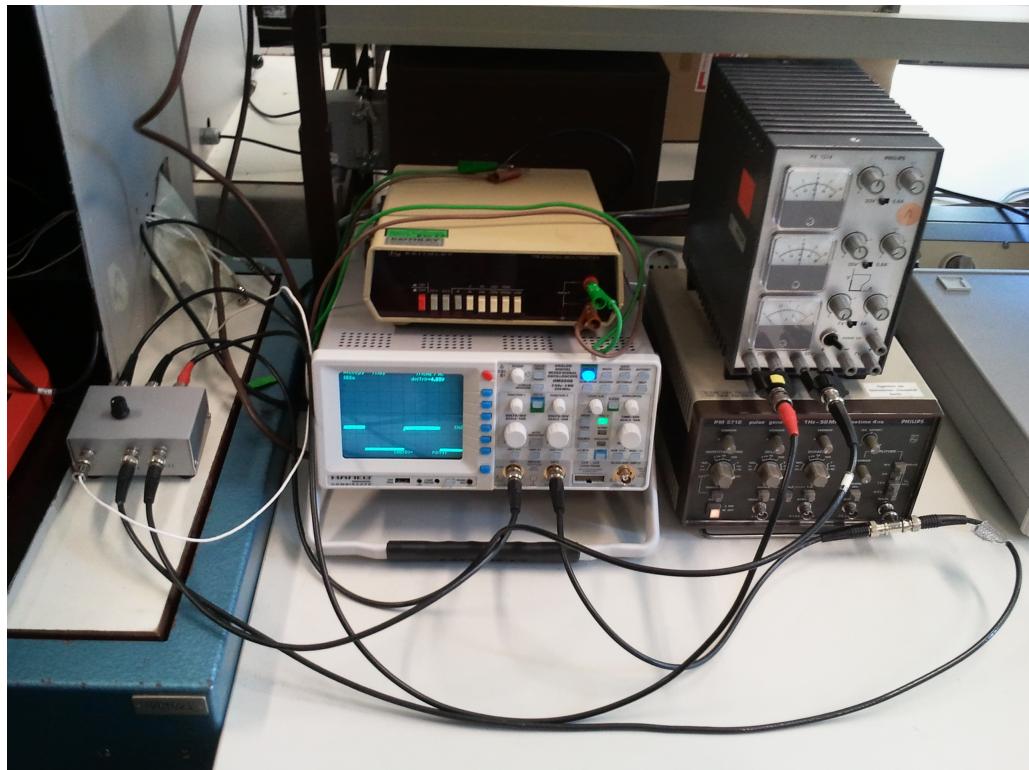


Abb. 69: Messaufbau

Quelle: Schaltung von Michael Sadowski und Clemens Helfmeier

Im folgenden werden die gemessenen Bahnwiderstände betrachtet. Zunächst wurden die Dies auf dem Wafer in Spalten und Zeilen eingeteilt. Es gibt 12 Zeilen und 12 Spalten. Jeder Die hat die gleichen Grundelemente (s. Abb. 70), allerdings ergeben sich fertigungsbedingt Unterschiede. So sind die Dies am Rand meist mehr verunreinigt als die im Zentrum. Deshalb ist es wichtig sich auf dem Wafer Dioden an unterschiedlichen Positionen anzusehen.

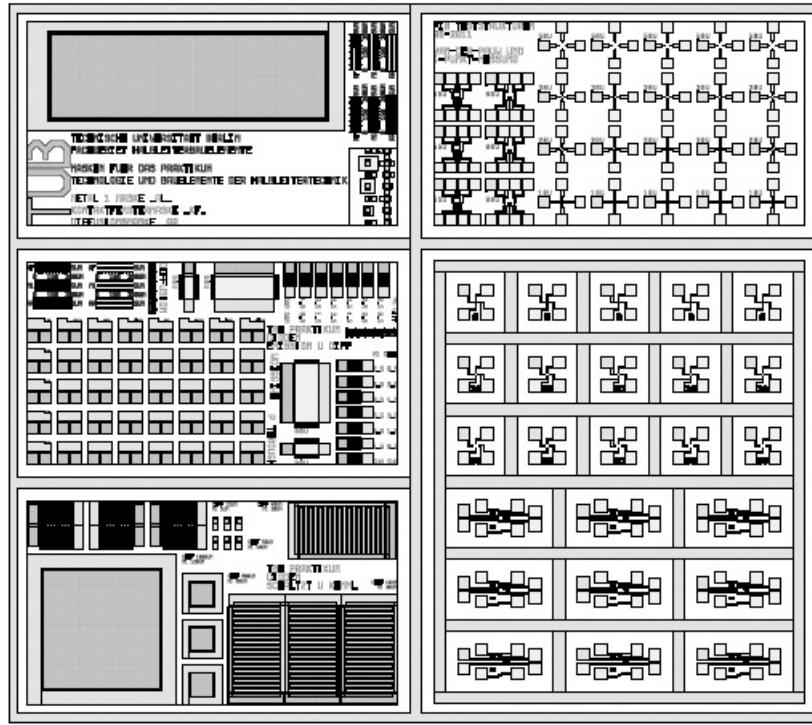


Abb. 70: Übersicht über einen Die

Quelle: Prof. Boit, Clemens Helfmeier, Philipp Scholz: Laborskript Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik (SS 2012)

Für den Bahnwiderstand wurde ein Grundelement eines Dies für unterschiedliche Flussströme vermessen. Das Grundelement wurde als Biggi 2 bezeichnet und ist die große Struktur unten links in Abb. 70. Die Flussströme wurden über Rechteckpulssignale unterschiedlicher Amplitude eingestellt. Die Tabelle 4 zeigt das Ergebnis dafür.

Rechteckpulsamplitude in V	Flussstrom in mA	Bahnwiderstand in $\Omega$
20	20	5.25
15	10	7
5	5	10

Tab. 4: Bahnwiderstand DIE 1 (Zeile 7 Spalte 6)  
Struktur: Biggi 2

Auffällig ist, dass sich für gleiche Verhältnisse von Spannung zu Strom unterschiedliche Widerstände ergeben. Dies liegt daran, dass für die Bahnwiderstände natürlich die Spannung an der Diode genutzt wird, die aus den gemessenen Kennlinien ermittelt werden. Eine davon ist in Abb. 71 zu sehen. Irritierend ist, dass die Kennlinie vertikal invertiert ist. Das ist der Polung geschuldet, da das N+ Gebiet an High und das P Gebiet an Low anliegt.

Außerdem zeigt sich bei dem Sprung ein starkes Überschwingen. Dies entsteht wohl durch den Funktionsgenerator.

Außerdem ist der Verlauf nach dem Spannungsabfall durch die Bahnwiderstände nicht ausschließlich linear. Zuerst steigt, bzw. fällt die Kennlinie nahezu linear an, bzw. ab, aber zur null hin hat sie eher einen exponentiellen Anstieg, bzw. Abfall. Dies könnte daran liegen, dass wenn nur noch wenige Ladungsträger in den Bahngebieten gespeichert sind die Beweglichkeit dieser zunimmt und sie schneller durch die Majoritäten durch Rekombination ausgeräumt werden können.

Bei den Bahnwiderständen muss man weiterhin beachten, dass eine Diodenkennlinie in Durchlassrichtung sehr steil ist. Dass heisst für eine große Änderung des Stromes erfolgt nur eine kleine Änderung der Spannung. Damit ist der Bahnwiderstand über das ohmsche Gesetz proportional zu dem Strom, wie man es in Tabelle 4 erkennen kann.

Des weiteren ist zu erkennen, dass die Bahnwiderstände für eine Diode von einigen  $\mu\text{m}$  doch ziemlich groß ist. Dies liegt daran, dass die eigentlichen Bahnwiderstände kaum gemessen werden können, da die Widerstände von den Zuleitungen und Kontakten hinzu kommen.

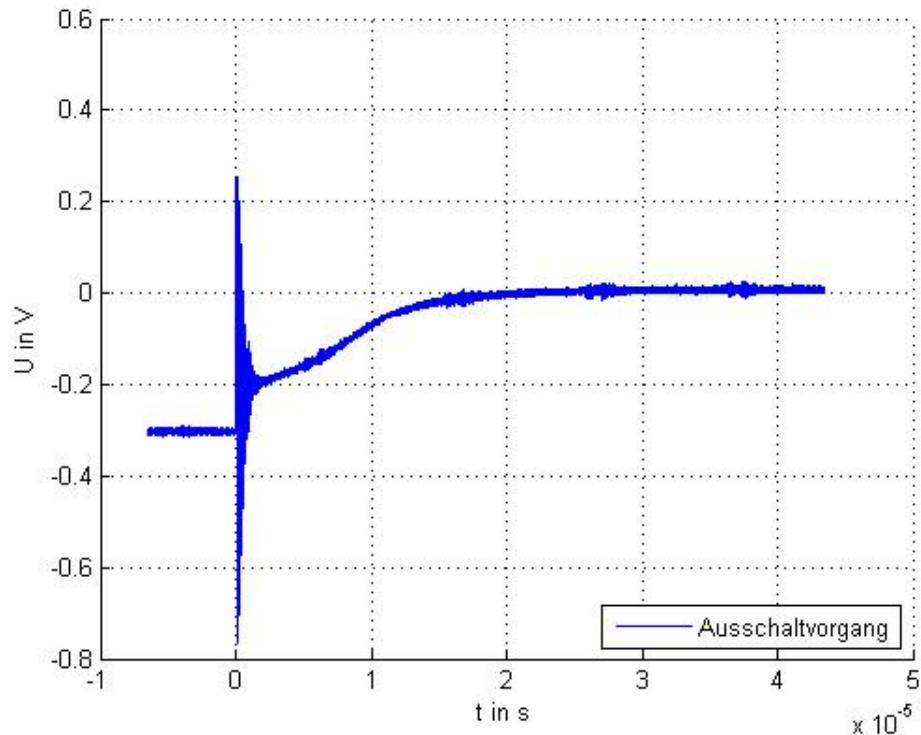


Abb. 71: Ausschaltvorgang gemessen

Im weiteren Verlauf werden auf dem Wafer für zwei Positionen (einmal in der Mitte und einmal am Rand) zwei verschiedene Strukturen vermessen. Zu der Struktur Biggi 2 kommt noch die große Fingerstruktur im linken unteren Rechteck in der rechten unteren Ecken hinzu (s. Abb. 70). Für die Stromabschaltung und den Bahnwiderstand ergaben sich die Messwerte in den Tabellen 5 bis 8. Die Spannungsamplitude des Eingangspulses liegt bei 5 V und damit fließt ein Vorwärtsstrom vom 5 mA.

### 3 SCHALTVERHALTEN

---

Bahnwiderstand	Minoritätsträgerlebensdauer
15 $\Omega$	0.298 $\mu\text{s}$

Tab. 5: DIE 2 (Zeile 8 Spalte 6) Struktur: Biggi 2

Bahnwiderstand	Minoritätsträgerlebensdauer
22 $\Omega$	1.6 $\mu\text{s}$

Tab. 6: DIE 3 (Zeile 6 Spalte 1) Struktur: Biggi 2

Bahnwiderstand	Minoritätsträgerlebensdauer
20 $\Omega$	10 $\mu\text{s}$

Tab. 7: DIE 2 (Zeile 8 Spalte 6) Struktur: große Finger

Bahnwiderstand	Minoritätsträgerlebensdauer
15 $\Omega$	1,25 $\mu\text{s}$

Tab. 8: DIE 3 (Zeile 6 Spalte 1) Struktur: große Finger

Die erwarteten 1-6  $\mu\text{s}$  werden nahezu erreicht. Bei zwei Werten liegen sie knapp außerhalb dieser Grenzen. Auch die Bahnwiderstände sind alle im Bereich zwischen 15-22  $\Omega$ , wie schon bei der Messung zuvor, bei der der Bahnwiderstand für die 5 mA bei 10  $\Omega$  lag. Leider lässt sich keine Aussage über die Abhängigkeit des Bahnwiderstands von der Lage auf dem Wafer treffen, dazu wären noch mehr Messungen nötig gewesen.

Auch bei der Minoritätsträgerlebensdauer lässt sich eine Abhängigkeit von der Lage auf dem Wafer erkennen. Allerdings scheint die Lebensdauer für die große Fingerstruktur höhere Minoritätsträgerlebensdauern zu erzielen. Dies könnte daran liegen, dass die Kapazität durch die vergrößerte Fläche zwischen P und N höher ist und damit auch die Speicher der Minoritäten größer werden.

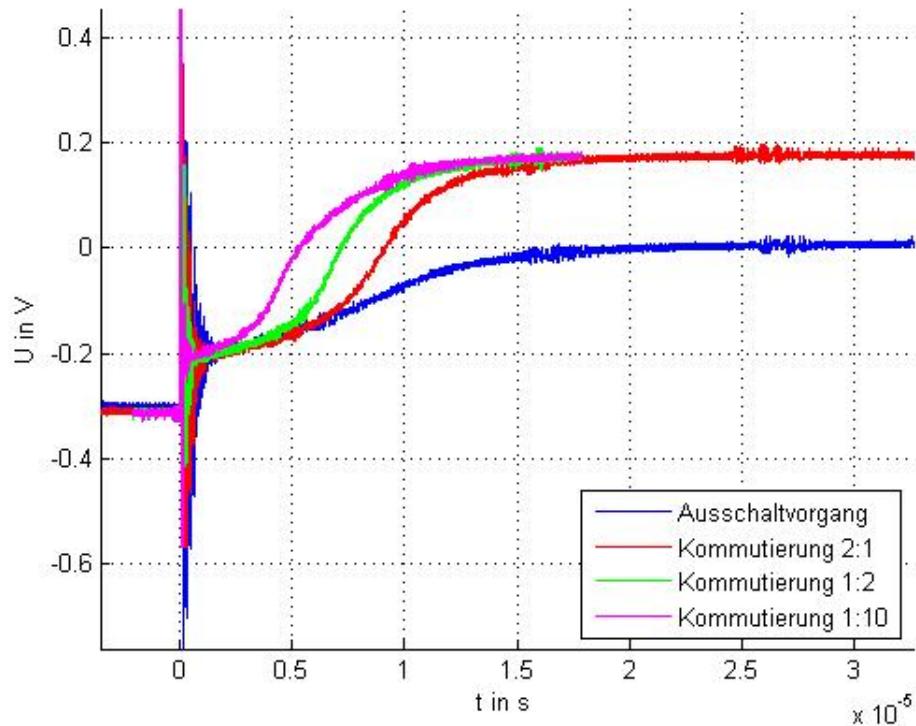


Abb. 72: Graphen für die Kommutierung

Für die Kommutierung bekommt man, je nachdem welches Verhältnis man für Vorwärts- zu Rückwärtsstrom einstellt unterschiedliche Kennlinien für eine Struktur. Diese sind wiederum vertikal invertiert. Es ist gut zu erkennen, dass der Abfall bis zum Nulldurchgang der Spannung in der Realität wieder nicht linear ist. Allerdings wird wie erwartet die Speicherzeit für ein kleineres Verhältnis von Vorwärts- zu Rückwärtsstrom kleiner, da die Minoritätsträgerlebensdauer konstant sein sollte (nach Formel 11).

Die Messwerte für die Strukturen Biggi 2 und die große Fingerstruktur sind in den Tabelle 9 und 10 zu sehen.

Lebensdauer bei Verhältnis	$\tau$ von DIE 2 (Zeile 8 Spalte 6)	$\tau$ von DIE 3 (Zeile 6 Spalte 1)
2:1	27 $\mu$ s	8,3 $\mu$ s
1:1	36 $\mu$ s	11,5 $\mu$ s
1:2	49 $\mu$ s	17,8 $\mu$ s
1:4	71 $\mu$ s	27,8 $\mu$ s
1:6	136 $\mu$ s	55,6 $\mu$ s

Tab. 9: Minoritätsträgerlebensdauer für Biggi 2

Lebensdauer bei Verhältnis	$\tau$ von DIE 2 (Zeile 8 Spalte 6)	$\tau$ von DIE 3 (Zeile 6 Spalte 1)
2:1	18 $\mu$ s	6,3 $\mu$ s
1:1	23 $\mu$ s	8,6 $\mu$ s
1:2	34,9 $\mu$ s	14,0 $\mu$ s
1:4	51,5 $\mu$ s	23,3 $\mu$ s
1:6	104 $\mu$ s	52,0 $\mu$ s

Tab. 10: Minoritätsträgerlebensdauer für große Fingerstruktur

Bei dieser Messreihe stehen mehr Messwerte zur Verfügung. Es ist auffällig, dass für ein kleineres Verhältnis von Vorwärts- zu Rückwärtsstrom die Lebensdauer zu nimmt. Idealer Weise sollte dies aber konstant bleiben.

Die Werte liegen außerdem teilweise deutlich außerhalb des erwarteten Bereichs von 1-6  $\mu$ s.

Bei diesem Messverfahren ist deutlich zu erkennen, dass es einen Unterschied zwischen den Dies in der Mitte und denen am Rand. Die am Rande Liegenden weisen deutlich kleinere Minoritätsträgerlebensdauern auf, was auf Verunreinigungen in den am Rande gelegenen Gebieten schließen lässt.

### 3.4 Zusammenfassung

Dies war der erste Versuchslauf für diese Schaltung. Dafür hat sie scheinbar schon Werte geliefert, die den erwarteten naheliegen. Allerdings gibt es noch einige Dinge, die man optimieren kann. So wurde zum Beispiel ein BNC Kabel als Verbindung zwischen Schaltung und Diode benutzt, welches eine relativ hohe Kapazität aufweist. Der Messaufbau wäre auch ohne dieses Kabel möglich.

Um die Spannung noch besser aufzulösen, könnte man außerdem die Verstärkung des nicht invertierenden Verstärkers erhöhen.

Die Anzahl der Messungen sollte man auch erhöhen, damit die Messwerte auch wirklich aussagekräftig sind und es wäre sinnvoll, wenn es die Zeit erlaubt, noch mehr unterschiedliche Strukturen zu vermessen, um den Einfluss der Größe und der Form auf die Bahnwiderstände und die Lebensdauern zu untersuchen.

Eine interessante Frage ist auch, warum die Lebensdauern für ein kleiner werdendes Verhältnis von Vorwärts- zu Rückwärtsstrom zunehmen, obwohl sie konstant sein sollten.

## 4 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 Exponentialtherm gesetzt. Daher kann man die Intensitätsmessung direkt mit diesem Therm 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.

### 4.1 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.

#### 4.1.1 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.

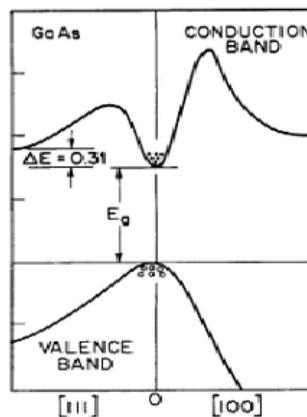


Abb. 73: Rekombination bei einem direkten Halbleiter

#### 4.1.2 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.

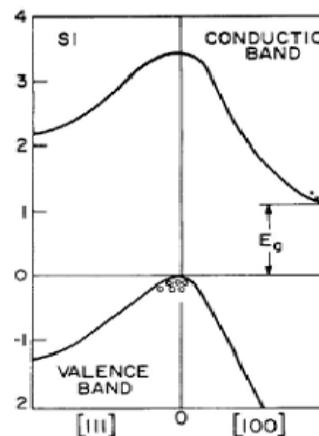


Abb. 74: Rekombination bei einem indirekten Halbleiter

Quelle: Prof. Boit, Clemens Helfmeier, Philipp Scholz: Laborskript Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik (SS 2012), S. 92

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.

## 4.2 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.

### 4.2.1 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:

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

Diese Rekombinationsenergie setzt sich aus dem Produkt aus dem Planckschen Wirkungsquantums  $h$  und die Frequenz des entstehenden Lichts  $\nu$ .

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

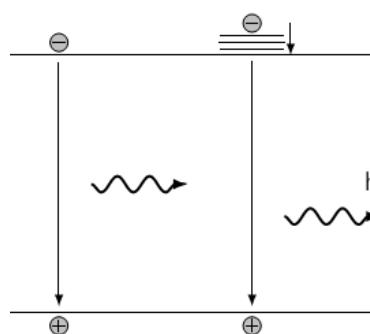


Abb. 75: strahlende Band-Band-Rekombination

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.

#### 4.2.2 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 Augerre-kombination dargestellt:

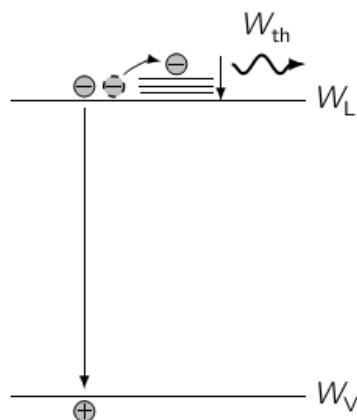


Abb. 76: nichtstrahlende Auger-Rekombination

Quelle: Prof. Boit, Clemens Helfmeier, Philipp Scholz: Laborskript Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik (SS 2012), S. 93,94

Die für die Emissiomessung verwendete Diode besteht aus Silizium, welcher ein indirekter Halbleiter ist und dessen Rekombinationen hauptsächlich nichtstrahlend sind. Wie aber schon bei den Halbleittertypen 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 den Emissiomessung sehr feine und genau Thermometer, welche im  $\mu\text{m}$ -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 entgegen gesetztes Gebiet injiziert und rekombinieren dort als Minoritäten mit den oppositär gepolten Ladungsträgern. Die dabei freigesetzte Energie kann dann als Emission wargenommen 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.

### 4.3 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  $-50^{\circ}\text{C}$  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. 77: Innenraum des Phemos

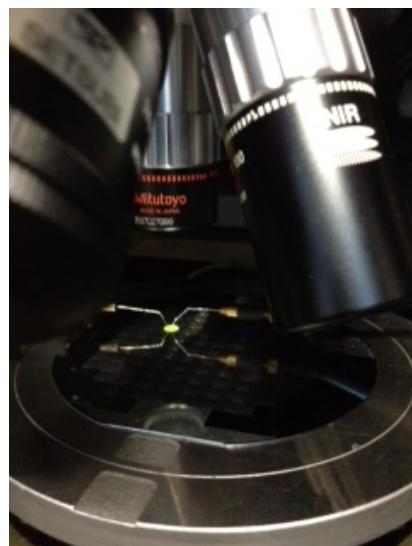


Abb. 78: kontaktierte Diode auf dem Wafer

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 sensibles 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-Subtraction durchgeführt. Bei dieser Dark-Subtraction 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.

#### 4.4 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 wiederspiegelt, 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.

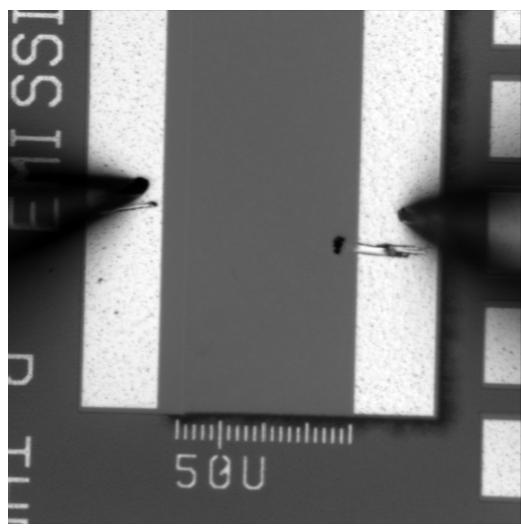


Abb. 79: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD-Kamera

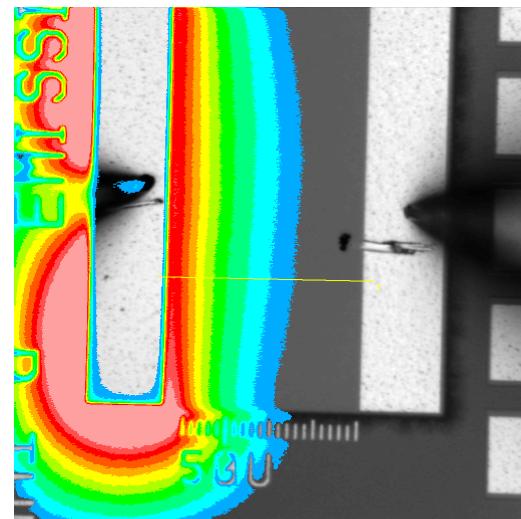


Abb. 80: selbe Diode nach der Emissionsmessung

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:

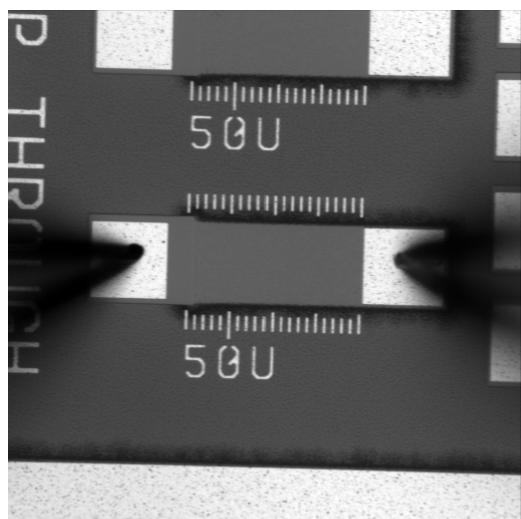


Abb. 81: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD-Kamera

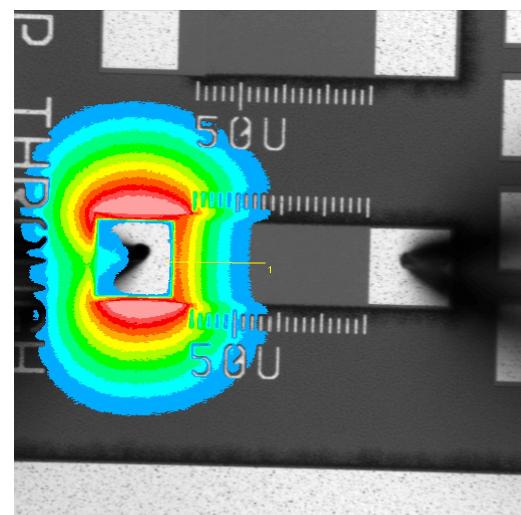


Abb. 82: selbe Diode nach der Emissionsmessung

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 V bei einem Strom von 25 mA. Die Messdauer wurde aus 3s variiert.

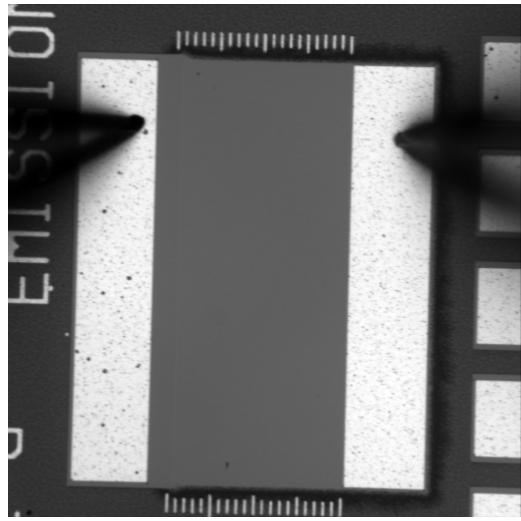


Abb. 83: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD Kamera

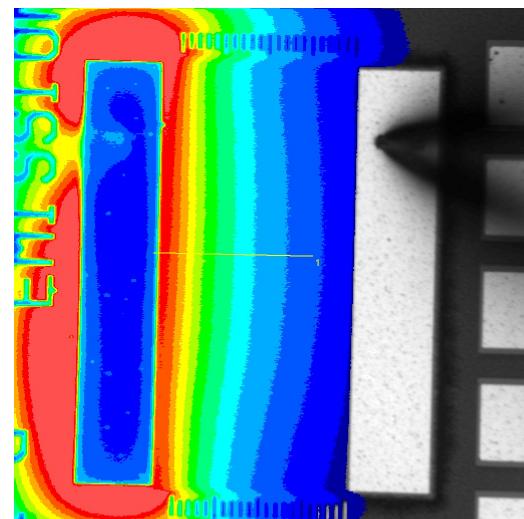


Abb. 84: selbe Diode nach der Emissionsmessung

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

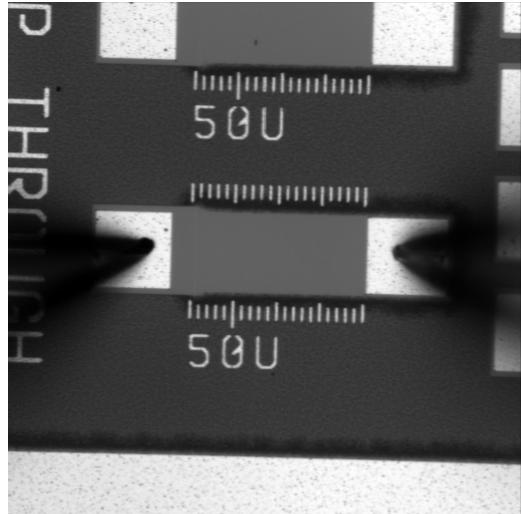


Abb. 85: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD Kamera

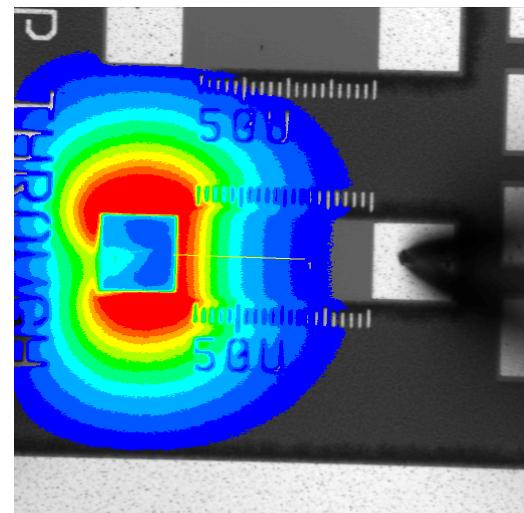


Abb. 86: selbe Diode nach der Emissionsmessung

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.

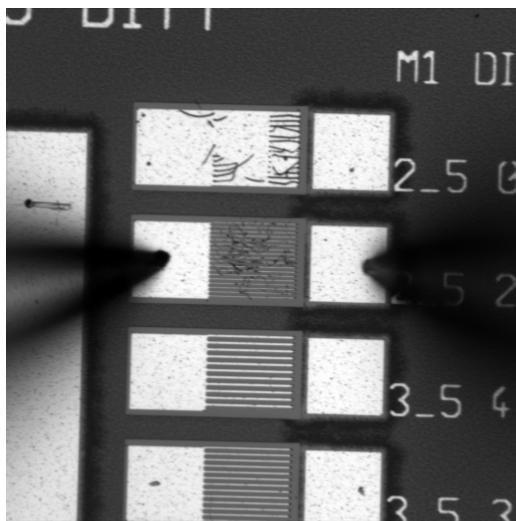


Abb. 87: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD Kamera

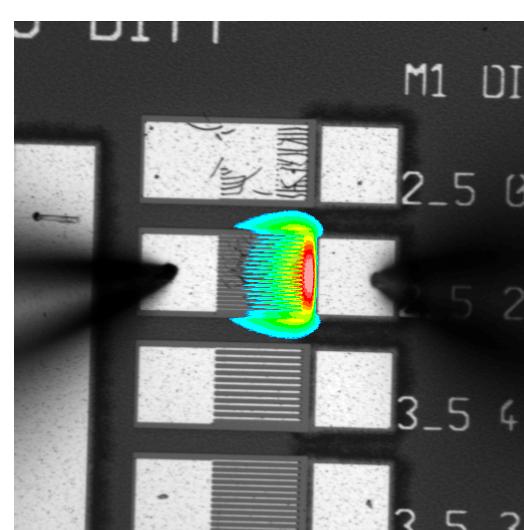


Abb. 88: selbe Diode nach der Emissionsmessung

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.

## 4.5 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 Exponentialtherms 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:

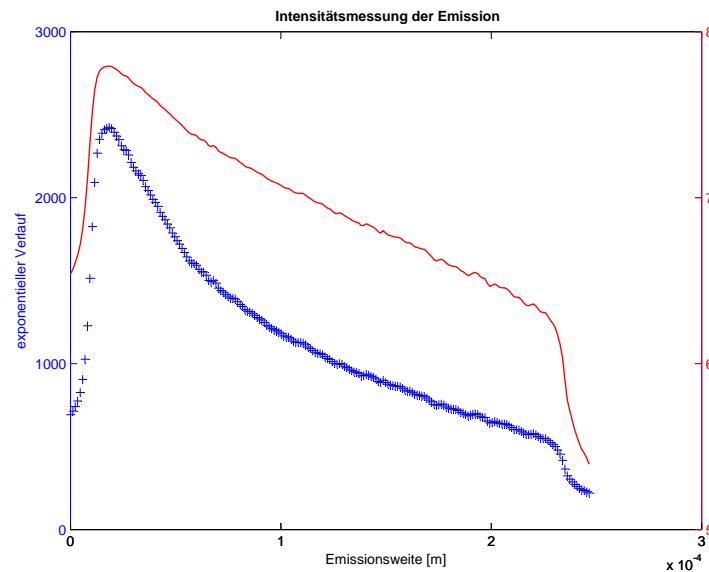


Abb. 89: Intensitätskurve der 1.Messung, exponentiell und logarithmisch

Die blaue Kurve zeigt den exponentiellen, die rote Kurve den logarithmischen Verlauf. Aus dieser wird nun der Kehrwert der Steigung ermittelt, welche eine Diffusionslänge von  $304,2 \mu\text{m}$  liefert.

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

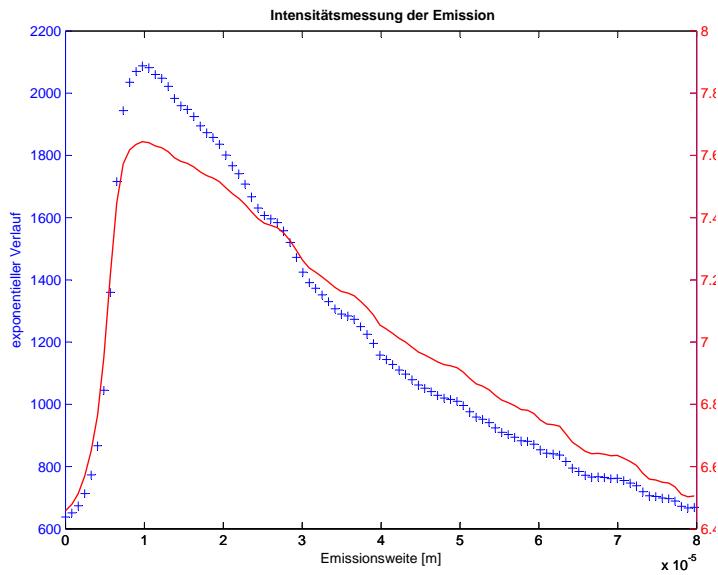


Abb. 90: Intensitätskurve der 2.Messung, exponentiell und logarithmisch

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

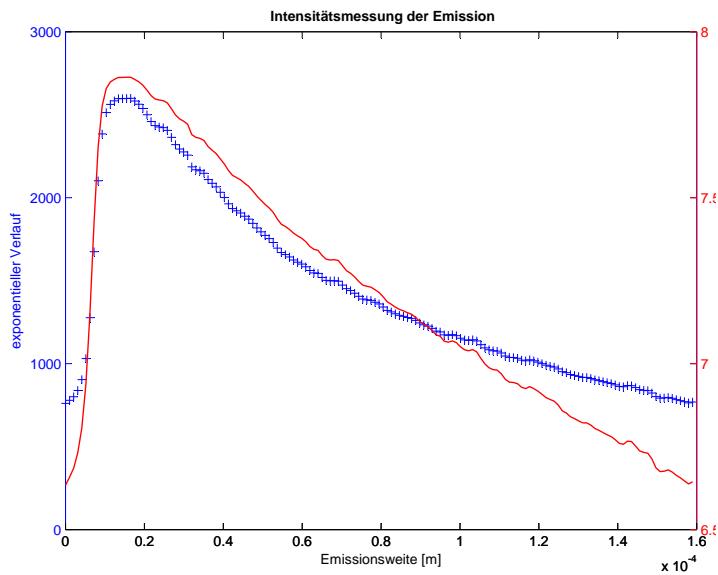


Abb. 91: Intensitätskurve der 3.Messung, exponentiell und logarithmisch

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

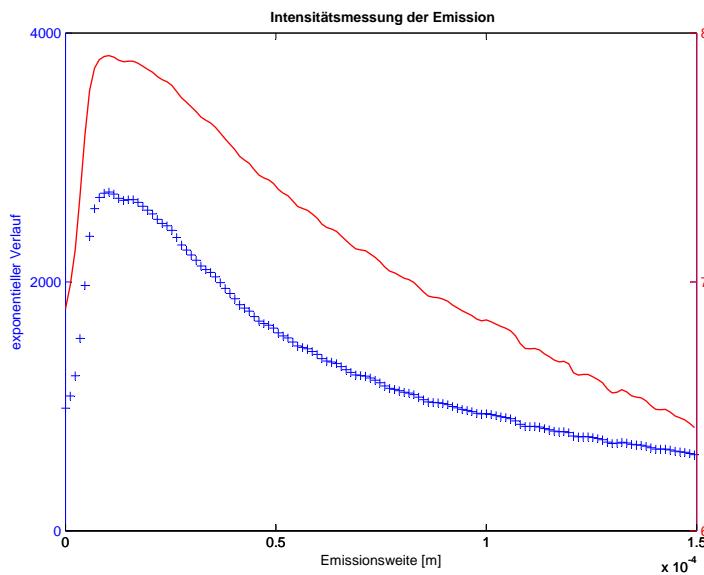


Abb. 92: Intensitätskurve der 4.Messung, exponentiell und logarithmisch

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

Obwohl diese Werte weit über dem Erwartungswert einer Diffusionslänge von  $150 - 200 \mu\text{m}$  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 unbemerkt Fehler begangen, der zu größeren  $L_n$ s führte.

## Literatur

- [1] Prof. Boit, Clemens Helfmeier, Philipp Scholz: Laborskript Technologie und Bauelemente der Halbleitertechnik (SS 2012)
- [2] Prof. Boit, Clemens Helfmeier, Philipp Scholz: Laborskript Praktikum Grundlagen und Bauelemente (WS 2011)
- [2] Silizium-Planartechnologie, Grundprozesse, Physik und Bauelemente; H.-G. Wagemann, T.Schönauer; B.G.Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2003;
- [3] [www.isis.tu-berlin.de/course/view.php?id=6010](http://www.isis.tu-berlin.de/course/view.php?id=6010), Zugriff 13.09.2012
- [3] [www.wikipedia.org/wiki/Physikalische\\_Gasphasenabscheidung](http://www.wikipedia.org/wiki/Physikalische_Gasphasenabscheidung), Zugriff 13.09.2012