



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 ()

zg Dogan (326 048)

1. September 2012

Gruppe 1

Betreuer:

Clemens Helfmeier

Philipp Scholz

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Kennlinie</b>	<b>1</b>
<b>2 Schaltverhalten</b>	<b>1</b>
<b>3 Emissionsmessung</b>	<b>1</b>
3.1 Direkter und indirekter Halbleiter . . . . .	2
3.1.1 direkter Halbleiter . . . . .	2
3.1.2 indirekter Halbleiter . . . . .	2
3.2 Rekombinationsmechanismen . . . . .	3
3.2.1 strahlende Rekombination . . . . .	3
3.2.2 nichtstrahlende Rekombination . . . . .	4
3.3 Messaufbau . . . . .	5
3.4 Messergebnisse . . . . .	6
<b>4 Auswertung</b>	<b>9</b>

## 1 Kennlinie

Benennung der Dateien:

Kennlinie<sub>Wavenummer</sub>Die[Zeile, Spalte]Messmessung.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

TODO:

müssen wir die Dies durchnummerieren?

## 2 Schaltverhalten

## 3 Emissionsmessung

TODO:

Einleitung, Theorie, Verknüpfung, Messung, Ergebnisse, Auswertung

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.

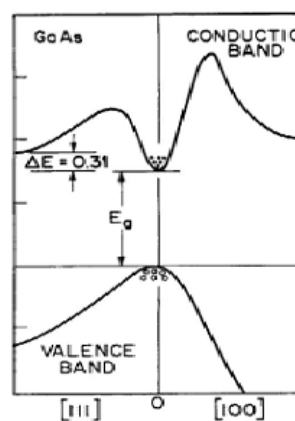


Abb. 1: Rekombination bei einem direkten Halbleiter

#### 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.

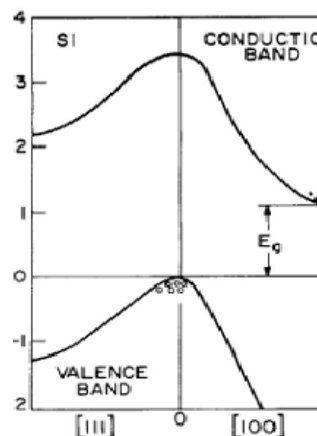


Abb. 2: Rekombination bei einem indirekten Halbleiter

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  $\nu$ .

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

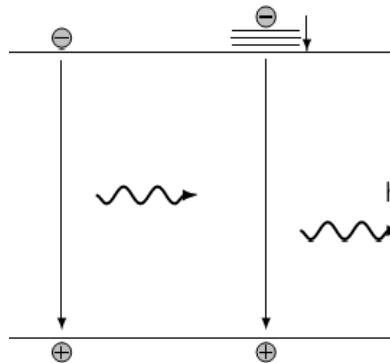


Abb. 3: strahlende Band-Band-Rekombination

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 unwarscheinlichere 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:

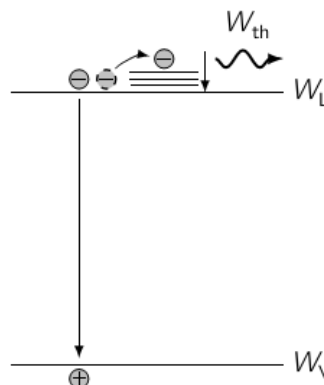


Abb. 4: nichtstrahlende Auger-Rekombination

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  $\mu m$ -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 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  $-50^\circ\text{C}$  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.

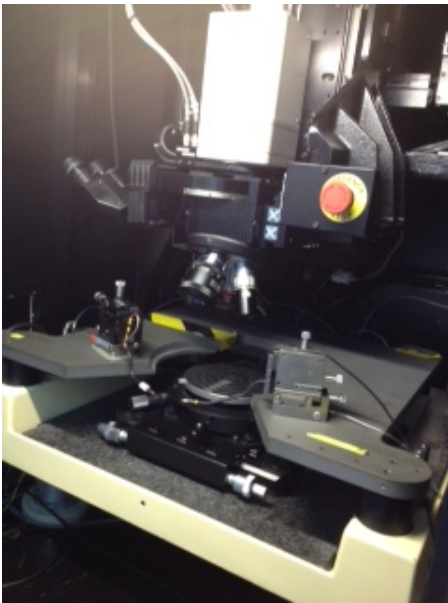


Abb. 5: Innenraum des Phemos

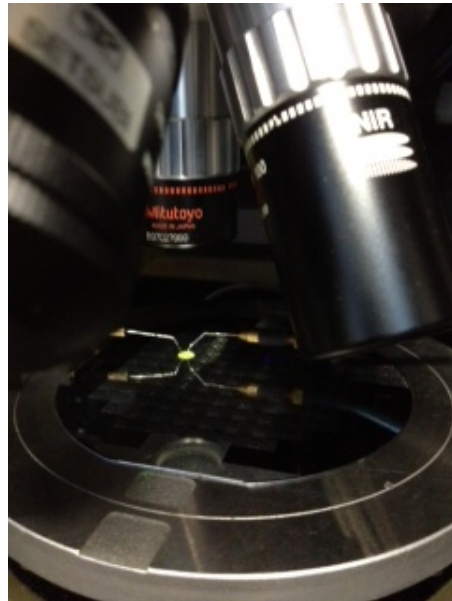


Abb. 6: kontaktierte Diode auf dem Wafer

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-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.

#### 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 hatten die Besonderheit, dass zwischen p- und n-Pad das Substrat nicht mit Siliziumoxid beschichtet war, damit an den pn-Übergang zwischen n-Gebiet und p-Substrat unverfälschte Emission gemessen werden konnte. 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 lag 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 wurden



die Strahlen so reflektiert, dass konstruktive Interferenz zwischen den Lichtwellen entstand und somit die Emission als viel stärker wahrgenommen wurde. Da dies nicht die wirkliche Intensität der Emission am pn-Übergang unserer Diode wieder spiegelt, 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  $1,2V$  bei  $25mA$  und einer Messdauer von  $4s$ .

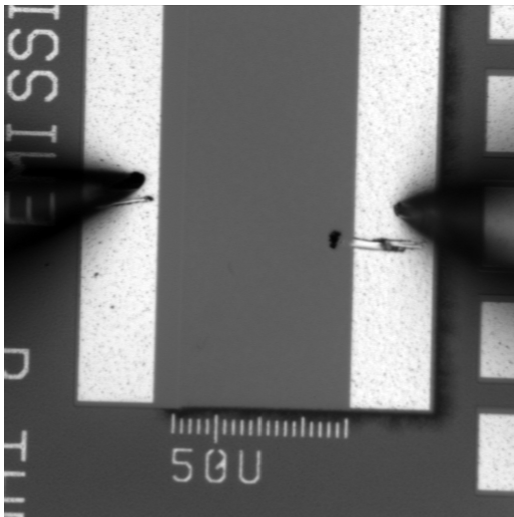


Abb. 7: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD Kamera

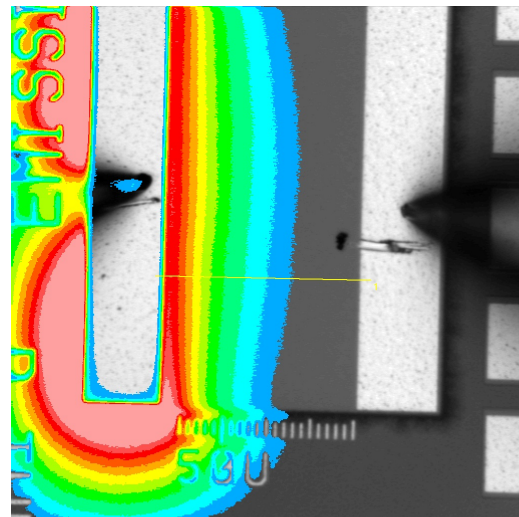


Abb. 8: selbe Diode nach der Emissionsmessung

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:

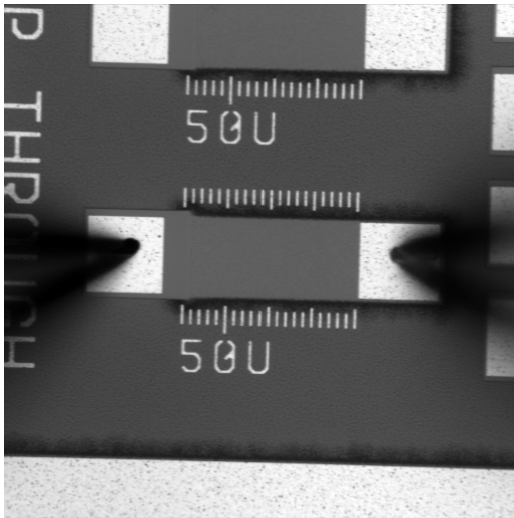


Abb. 9: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD Kamera

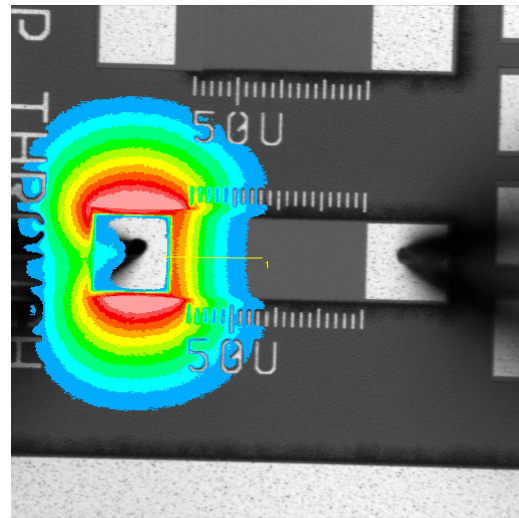


Abb. 10: selbe Diode nach der Emissionsmessung

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  $1,2V$  bei einem Strom von  $25mA$ . Die Messdauer wurde auf  $3s$  variiert.

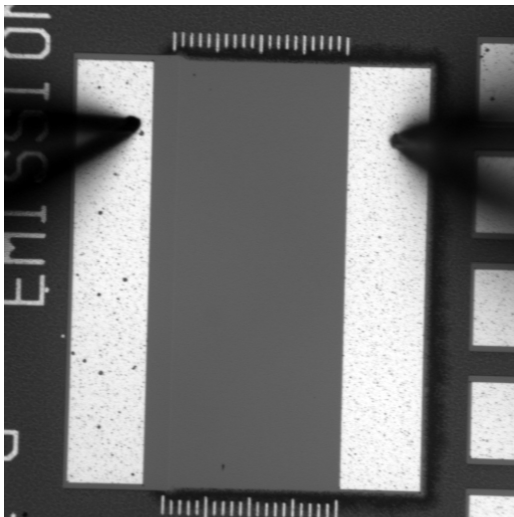


Abb. 11: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD Kamera

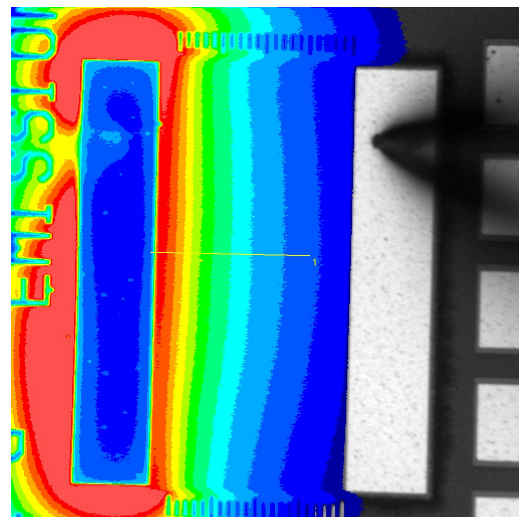


Abb. 12: selbe Diode nach der Emissionsmessung

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

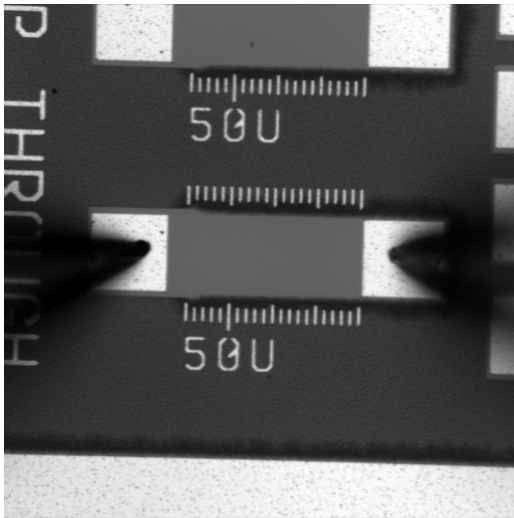


Abb. 13: kontaktierte Diode, Live-Bild der CCD Kamera

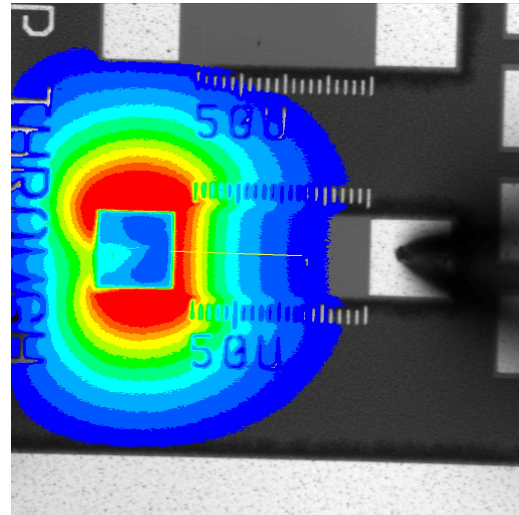


Abb. 14: selbe Diode nach der Emissionsmessung

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.

## 4 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:

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

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 der Dioden berechnen.

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

ätsmessung.pdf

./Emissionsbilder/eins/Intensit\protect \

Abb. 15: Intensitätskurve, exponentiell und  
logarithmisch