

Gruppe Nr. _____

Kurs: ~~Mo1~~ Mo2 Mi3
zutreffendes bitte ankreuzen

WS23/24

aktuelles Semester angeben

Versuch: Photoresistance

Namen: ()

()

Assistent: _____

durchgeführt am: _____

Protokollabgabe am: _____

vom Betreuer auszufüllen

Note gesamt + 0 -

Anerkannt: _____
(Datum Unterschrift)

Datum Rückgabe: _____

Bemerkung:

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	3
1 Theoretische Grundlagen	6
1.1 Halbleiter unter Lichteinstrahlung	6
1.2 Ladungsträger im Halbleiter	6
1.2.1 Gleichgewichtsladungsträger	6
1.2.2 Überschussladungsträger	6
1.3 Lebensdauer der Überschussladungsträger	7
1.3.1 Lineare Rekombination	7
1.3.2 Quadratische Rekombination	7
1.4 Frequenzabhängigkeit	7
2 Experimenteller Aufbau	8
3 Auswertung	9
3.1 Vermessung der Strom-Spannungskennlinie des Photowiderstandes	9
3.2 Rekombination der Ladungsträger durch Variierung der Intensität	9
3.3 Widerstand in Abhängigkeit von der Wellenlänge	10
3.4 Frequenzabhängigkeit des Widerstands	12
Quellen	13

Photowiderstand

Vorbereitung

Bändermodell, Generation und Rekombination von Ladungsträgern, Intensitätsabhängigkeit der Photoleitfähigkeit, Frequenzabhängigkeit der Photoleitfähigkeit

Einführung

Am II-VI Halbleiter CdS soll beispielhaft die Eigenschaft eines Photowiderstandes untersucht werden. Machen Sie sich Überlegungen zu einem geeigneten Versuchsaufbau.

Aufgaben

1. Vermessen Sie die Strom-Spannungskennlinie des Photowiderstandes für die Wellenlängen 647 nm und 549 nm im Bereich von 1 - 10V. Vergleichen Sie dies mit einer Messung bei abgedunkeltem Photowiderstand. Diskutieren Sie das Ergebnis.
2. Bestimmen Sie bei konstanter Spannung (1 - 10V) und konstanter Wellenlänge (z.B. mit Interferenzfilter 549 nm) die Abhängigkeit des Photostroms von der Bestrahlungsstärke. Die Bestrahlungsstärke kann mit dem Winkel zwischen den Achsen von zwei hintereinander gestellten Polarisationsfiltern variiert werden. Welche Art der Rekombination liegt vor?
3. Messen Sie die Abhängigkeit der Photoleitfähigkeit von der Wellenlänge des einfallenden Lichts. Dabei darf die Zahl der pro Zeiteinheit einfallenden Photonen nicht von der Wellenlänge abhängen. Damit der auf den Photowiderstand einfallende Photonenstrom bei allen Wellenlängen gleich groß ist, müssen die auf der Rückseite angegebenen Wellenlängenabhängigkeiten der spektralen Energiestromdichte der Halogenlampe und des Transmissionsgrads der parallel stehenden Polarisationsfilter durch Verändern des Winkels zwischen den Achsen der Polarisationsfilter kompensiert werden. Machen Sie sich dies anhand einer Gleichung deutlich.
Die Wellenlänge wird mit einem keilförmigen Interferenzverlauffilter variiert. Wegen des keilförmigen Aufbaus ändert sich die Wellenlänge, mit der Licht an einer Stelle durchgelassen wird, linear mit dem Ort. Die Ortsabhängigkeit wird mit zwei festen Interferenzfiltern kalibriert.
Diskutieren Sie die gefundene Wellenlängenabhängigkeit des Photostroms. Warum nimmt der Photostrom sowohl zu kleinen Wellenlängen wie zu großen Wellenlängen hin ab? Wie groß ist die Bandlücke von CdS?
4. Messen Sie die Frequenzabhängigkeit der Photoleitfähigkeit und bestimmen Sie daraus die Lebensdauer der Elektronen.
Als Lichtquelle wird eine blaue Lumineszenzdiode verwendet, deren Intensität mit einem Funktionsgenerator sinusförmig moduliert wird. Wegen der nicht-linearen Abhängigkeit der Photoleitfähigkeit von der Bestrahlungsstärke, die in Aufgabe 2 gemessen wurde, muß ein kleiner Modulationsgrad eingestellt werden. Überprüfen Sie den zeitlichen Verlauf der Intensität mit einer Silizium-Photodiode und einem Oszilloskop.
Der Photostrom wird mit einem Lock-In Verstärker als Spannungsabfall an einem Serienwiderstand gemessen. Der Lock-In Verstärker zeigt den Effektivwert des sinusförmigen Wechselanteils dieser Spannung an.

Vorsicht: *Photowiderstand nicht überlasten (maximal 0,1W)*

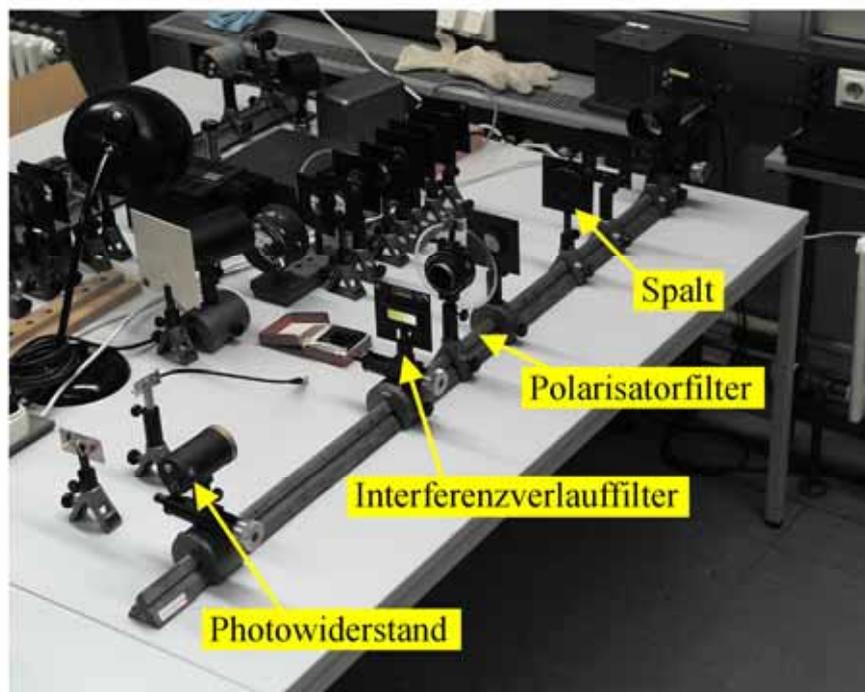
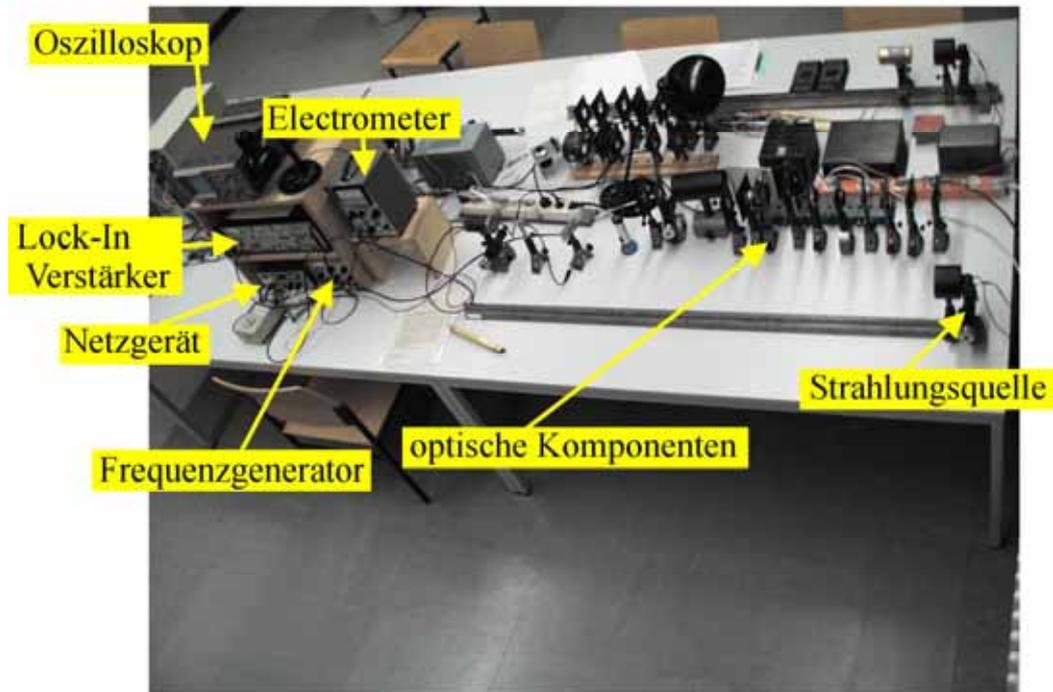
Literatur

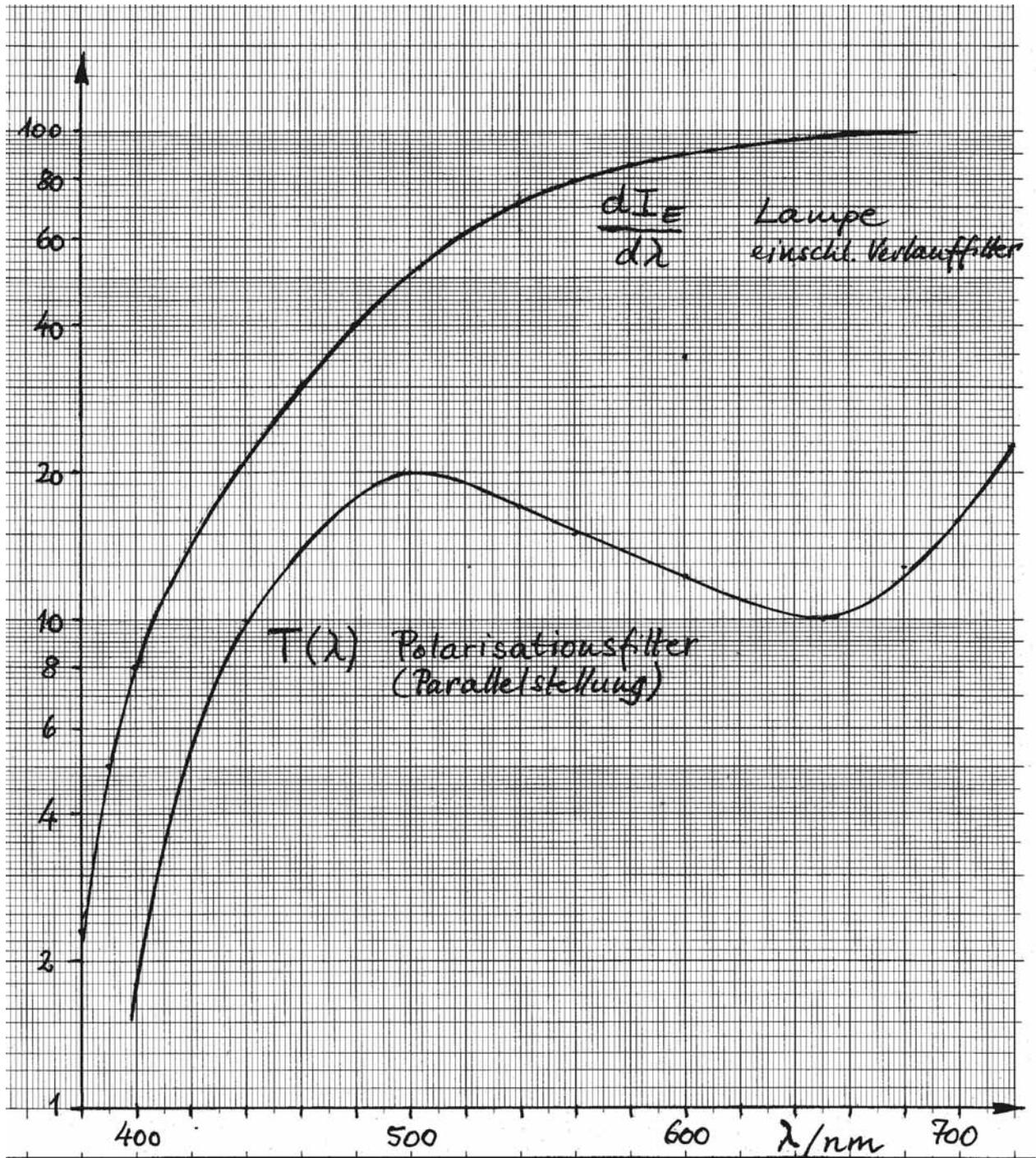
J. S. Blakemore, Solid State Physics

R. H. Bube, Photoconductivity of Solids

S. M. Rywkin, Photoelektrische Erscheinungen in Halbleitern

Versuchsanordnung





1 Theoretische Grundlagen

Alle folgenden Informationen stammen aus [AP].

1.1 Halbleiter unter Lichteinstrahlung

Treffen Photonen auf Halbleiter, treten abhängig von der Photonenenergie $\hbar\omega$ im Verhältnis zur Bandlücke E_g verschiedene Effekte auf.

1. Für $\hbar\omega < E_g$ gibt es keine Absorption.
2. Für $\hbar\omega > E_g$ wird das Photon absorbiert und erzeugt ein Elektron-Loch Paar.
3. Für $\hbar\omega \gg E_g$ wird auch ein Elektron-Loch Paar durch Absorption erzeugt, es gibt aber zusätzlich noch eine große Überschussenergie $\hbar - E_g$ als kinetischer Energie von Elektron und Loch vor.

Falls Elektron-Loch Paare erzeugt wurden, rekombinieren diese nach einer mittleren Lebensdauer T wieder.

1.2 Ladungsträger im Halbleiter

1.2.1 Gleichgewichtsladungsträger

Zur Leitfähigkeit tragen freie Elektronen im Leitungsband und positive Löcher im Valenzband bei. Deren Verteilung ist ohne äußere Einflüsse im Gleichgewichtszustand eine Fermiverteilung. Daraus ergibt sich eine Gleichgewichtsleitfähigkeit σ in Abhängigkeit von der Menge an freien Elektronen n_0 und positiven Löchern p_0 zusammen mit der jeweiligen Beweglichkeit μ

$$\sigma = e \cdot (n_0\mu_n + p_0\mu_p) \quad (1.1)$$

1.2.2 Überschussladungsträger

Werden durch einfallende Photonen Elektronen-Loch Paare erzeugt, werden die so erzeugten Ladungsträger als Überschussladungsträger $\Delta n/\Delta p$ bezeichnet. Diese tragen zur Gesamtzahl der Ladungsträger und damit zur Leitfähigkeit bei.

$$\sigma = e \cdot [(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p] \quad (1.2)$$

Die Menge der produzierten Überschussladungsträger richtet sich nach der absorbierten Intensität I des Lichts. Durch die paarweise Erzeugung gilt für die

$$\Delta n = \Delta p \propto I \quad (1.3)$$

Zusammen mit der Lebensdauer τ kann die Menge an Überschussladungsträgern und damit die zusätzliche Leitfähigkeit $\Delta\sigma$ im Gleichgewichtszustand bestimmt werden.

$$\Delta\sigma = e \cdot \beta \cdot k \cdot I \cdot (\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p) \propto \Delta n \quad (1.4)$$

Hier sind β die Quantenausbeute und k der materialabhängige Absorptionsfaktor.

1.3 Lebensdauer der Überschussladungsträger

Die Lebensdauer τ ist im Allgemeinen für Elektronen und positive Löcher nicht gleich. Dominiert eine Lebensdauer, spricht man von unipolarer Überschussleitfähigkeit und kann eine Ladungsträgersorte vernachlässigen. Es gibt zwei Möglichkeiten, wie sich die Lebensdauer im Verhältnis zur Menge an Überschussladungsträgern verhält.

1.3.1 Lineare Rekombination

Die Rekombinationsrate hängt in diesem Fall linear von der Überschussladungsträgerdichte $\Delta n'$ ab

$$\frac{d\Delta n'}{dt} = \beta k I - \frac{\Delta n'}{\tau}. \quad (1.5)$$

Löst man diese DGL ergibt sich eine stationäre Konzentration von

$$\Delta n'_{\text{stat}} = \tau \beta k I \quad (1.6)$$

und ein zeitlicher Verlauf nach Abschalten des Lichts von

$$\Delta n'(t) = \tau \beta k I \cdot \exp(-t/\tau). \quad (1.7)$$

1.3.2 Quadratische Rekombination

Die Rekombinationsrate hängt in diesem Fall quadratisch von der Überschussladungsträgerdichte $\Delta n'$ ab

$$\frac{d\Delta n'}{dt} = \beta k I - \gamma (\Delta n')^2. \quad (1.8)$$

Löst man diese DGL ergibt sich eine stationäre Konzentration von

$$\Delta n'_{\text{stat}} = \sqrt{\frac{\beta k I}{\gamma}} \quad (1.9)$$

1.4 Frequenzabhängigkeit

Beleuchtet man den Photowiderstand mit Licht, dessen Intensität sinusförmig mit der Frequenz ω modelliert wird, erhält man einen Zusammenhang für die Überschussladungsträgerdichte von

$$|\Delta n'| = \frac{\Delta G \cdot \tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad (1.10)$$

mit der Generationsrate der Elektronen G und der Relaxationszeit τ . Für die Phasenverschiebung gegenüber der Anregung gilt

$$\tan \varphi = -\omega \tau \quad (1.11)$$

2 Experimenteller Aufbau

Wie in Abbildung 2.1 zusehen, besteht der Versuchsaufbau aus einer Halogenlampe. Der Brennpunkt der ersten Linse liegt im Wellenlängenfilter. Dieser ist je nach Messung verstellbar oder monochromatisch. Die folgende Linse parallelisiert das Licht wieder, sodass die Intensität des Lichts bei Bedarf durch zwei aufeinanderfolgende Polarisationsfilter eingestellt werden kann. Das Licht wird durch die letzte Linse in den Photowiderstand gebündelt. Am Photowiderstand ist ein Spannungsgenerator und ein Stromstärkemessgerät angeschlossen. Beide werden durch ein Labview-Programm gesteuert.



Abbildung 2.1: Foto des optischen Teils des Versuchsaufbaus. Von links nach rechts: Halogenlampe, Linse, verstellbarer Wellenlängenfilter, Linse, fester Polarisationsfilter, verstellbarer Polarisationsfilter, Linse, Photowiderstand

3 Auswertung

3.1 Vermessung der Strom-Spannungskennlinie des Photowiderstandes

Die Stromstärke am Photowiderstand wurde ohne Lichteinfall und für einfallendes Licht der Wellenlängen 647 nm und 549 nm im Bereich von 0 bis 10 V vermessen. Dazu wurde der jeweilige monochromatische Wellenlängenfilter in den Versuchsaufbau eingesetzt. Da das Messgerät nur in der Lage ist Stromstärken bis 10 mA genau zu messen, wurden alle Datenpunkte mit größerer Stromstärke von der Analyse ausgeschlossen. Um den Widerstand des Photoresistors zu ermitteln, wird ein linearer Fit durch die Spannungs- und Stromstärkedaten angefertigt, wie in Abbildung ?? zu sehen. Für den Widerstand ergibt sich wie in Tabelle 3.1 sichtbar, dass ohne einfallendes Licht der Widerstand des Photoresistors um drei Größenordnungen größer ist, als mit Licht. Der Widerstand hängt folglich tatsächlich von der Lichteinstrahlung ab.

Tabelle 3.1: Widerstände am Photoresistor für verschiedene Lichteinstrahlung

Wellenlänge λ [nm]	Widerstand R [k Ω]
549	0.47 ± 0.18
647	1.19 ± 0.24
ohne Licht	$(2.58 \pm 0.25) \cdot 10^3$

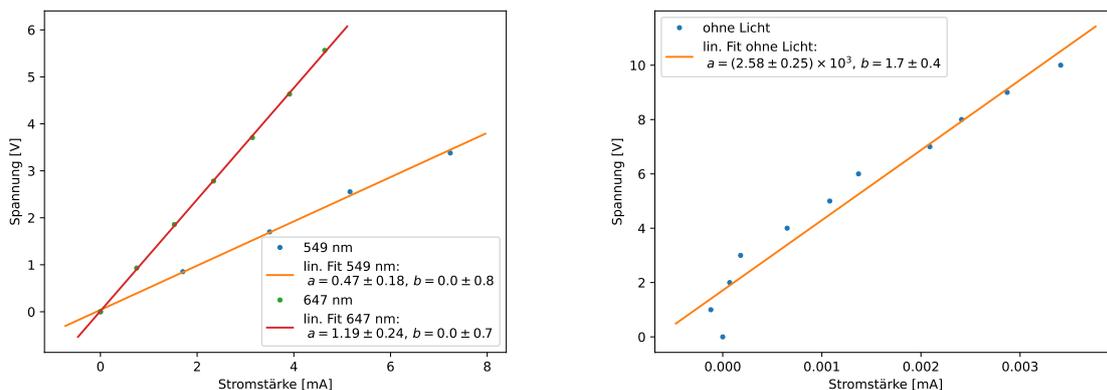


Abbildung 3.1: Stromstärke und Spannung am Photoresistor mit und ohne einfallendes Licht mit linearem Fit

3.2 Rekombination der Ladungsträger durch Variierung der Intensität

Der 647 nm Filter wird eingesetzt und die Intensität über 2 hintereinandergestellte Polarisationsfilter verändert. Die Stromstärke am Photowiderstand wird für eine angelegte Spannung von

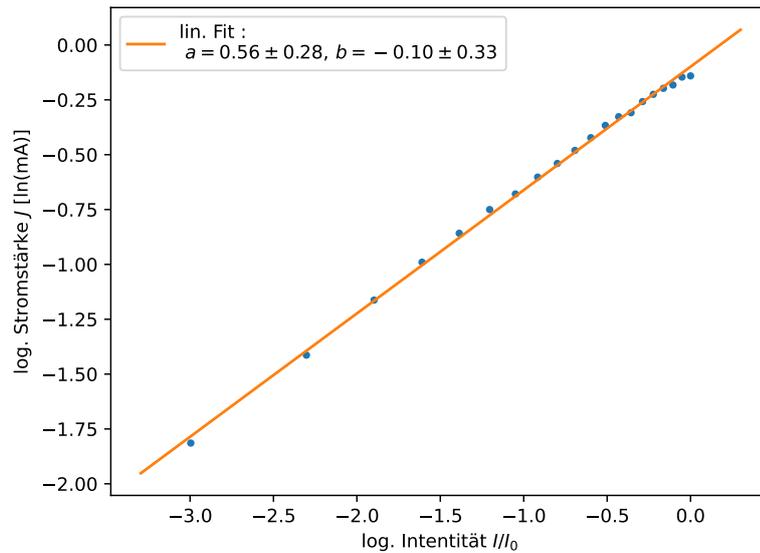


Abbildung 3.2

3 V gemessen. Um die Polarisationsfilter zu kalibrieren, wird der verstellbare aus 90° eingestellt und der andere Polarisationsfilter wird so lange gedreht bis minimaler Strom am Photowiderstand gemessen wird. Um zu überprüfen, ob die Rekombination linear nach Gleichung 1.6 oder quadratisch nach Gleichung 1.9 ist, wird ein Fit der logarithmischen Stromstärke über die logarithmische Intensität mit der Funktion

$$\ln(J) = a \cdot \ln(I/I_0) + b \quad (3.1)$$

durchgeführt. Wie in Abbildung 3.2 sichtbar, das Ergebnis des Fits für den Exponenten a

$$a = 0.56 \pm 0.28 \quad (3.2)$$

was ungefähr dem Zusammenhang für quadratische Rekombinationszeit mit einem theoretischen Wert von $a = 0.5$ entspricht. Dass der theoretische Wert nicht innerhalb der Unsicherheit liegt, lässt sich damit erklären, dass die hier angegebenen Unsicherheiten immer nur statistische Unsicherheiten aus dem Fit sind und die Unsicherheit des Messwertes nicht berücksichtigt wird.

3.3 Widerstand in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Der monochromatische Filter wird durch einen verstellbaren Wellenlängenfilter ersetzt. Damit die einfallende Intensität für alle Wellenlängen gleich groß ist, wird für jede Messung die Intensität über die Polarisationsfilter angepasst. Die nötige Einstellung wird dabei vom Labviewprogramm anhand von Kalibrierungswerten mit den monochromatischen Filtern bekannter Wellenlänge berechnet. Dazu wird ein monochromatischer Filter vor dem verstellbaren Filter eingebaut und dieser auf eine Farbe maximalen Stroms am Widerstand eingestellt, sodass die Farben möglichst gleich sind. Die Werte werden in das Labviewprogramm übernommen. Dies wird für alle 3 vorhandenen Farbfilter gemacht. Die am Widerstand angelegte Spannung beträgt wieder 3 V.

Die Stromstärke besitzt einen Peak, der ungefähr bei der Bandlückenenergie liegt, da für große Wellenlängen die Photonenenergie kleiner als die Bandlücke ist und so keine Überschussladungsträger angeregt werden können. Für kleine Wellenlängen findet die Absorption der Photonen hingegen

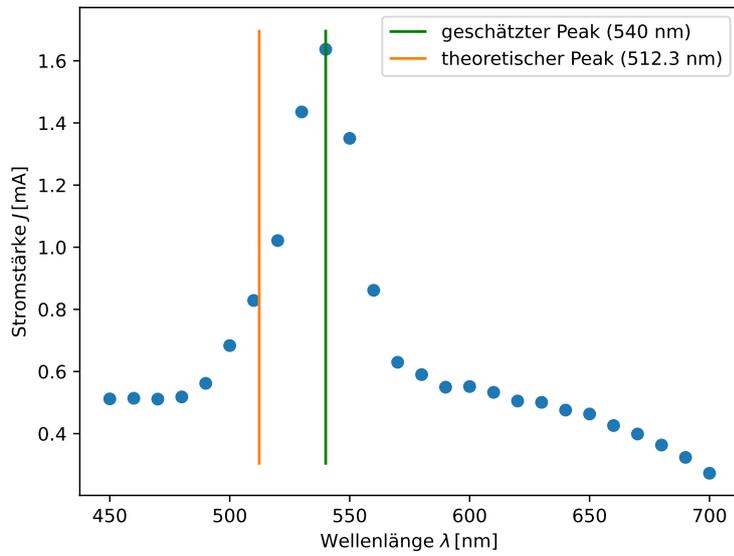


Abbildung 3.3: Intensität über die Wellenlänge mit theoretischem Peak

schon nahe der Oberfläche statt, wo der Photoresistor viele Fehlstellen aufweist, was die Ausbeute an Überschussladungsträgern durch schnelle Rekombination minimiert. Das Maximum liegt, wie in Abbildung 3.3 sichtbar, bei 540 nm, was einer Energie von ≈ 2.29 eV entspricht. Dies liegt ein Stück neben dem theoretischen Wert für die Bandlücke von 512.3 nm bzw. 2.42 eV. Die Abweichung vom Literaturwert von 1.3 eV lässt sich auch hier durch die fehlenden Unsicherheiten auf die Messwerte erklären.

3.4 Frequenzabhängigkeit des Widerstands

Die Lichtquelle wird durch eine blaue Lumineszenzdiode ersetzt, deren Intensität sinusförmig über den Frequenzgenerator modelliert wird. Gemessen wird die Phasenverschiebung und die Amplitude des Stroms am Photowiderstand für eine angelegte Spannung von 5 V. Der Zusammenhang zwischen Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ und ω in Gleichung 1.11 wird genutzt, um die Lebensdauer τ mit einem linearen Fit zu bestimmen. Die ersten 15 Datenpunkte wurden aus dem Fit ausgeschlossen, weil sie bei niedrigen Frequenzen nicht dem linearen Zusammenhang entsprechen. Man erhält

$$\tau = 0.5 \pm 0.4 \text{ ms} \quad (3.3)$$

Alternativ kann die Lebensdauer über den Schnittpunkt der beiden Geraden in Abbildung 3.4 bestimmt werden. Hier erhält man einen Wert von

$$\tau = 2.1 \pm 57.1 \text{ ms} \quad (3.4)$$

Der Fehler ist hier um eine Größenordnung größer als der eigentliche Messwert, da pro Fit nur 5 bis 6 Datenpunkte verwendet wurden. Dieser Wert ist damit deutlich ungenauer als der vorherige.

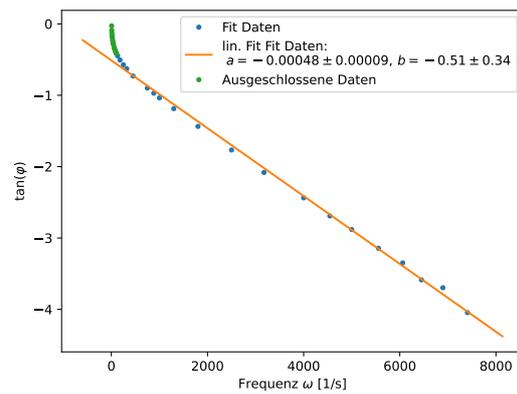
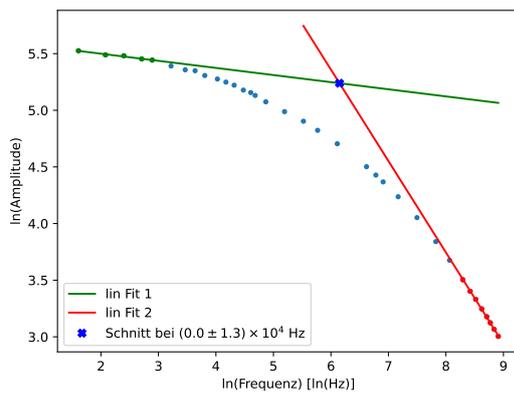


Abbildung 3.4: logarithmische Frequenz und Amplitude mit linearen Fits und Schnittpunkt

Abbildung 3.5: Frequenz über $\tan(\varphi)$ mit linearem Fit.

Quellen

[AP] ANGEWANDTE PHYSIK, Institut für: *Der Photowiderstand*