



1 Hintergrund

1.1 Denkmodelle der Festkörperphysik

1.1.1 Schalenmodell

Die Lehre der klassischen Physik ging nach dem Planetenmodell davon aus, dass für ein Elektron, je nach seiner Umlaufgeschwindigkeit um den Kern seines Atoms, also nach seiner kinetischen Energie, jede beliebige Umlaufbahn möglich sei. Dies stieß jedoch in der modernen Quantenphysik, speziell bei der Betrachtung des umlaufenden Elektrons als Ursache einer Lichtaussendung, auf Widerspruch. Der Physiker Nils Bohr entwickelte die Theorie, dass sich ein solches Elektron nur auf ganz bestimmten stationären Bahnen längere Zeit aufhalten kann. Es erfolgt eine Energieabgabe (Lichtaussendung), wenn das Elektron von einer Bahn zu einer anderen springt, der eine kleinere Energie zugeordnet ist.

Die Bahnen, auf denen sich die Elektronen bewegen, nennt man auch "Schalen". Die Schalen haben unterschiedliches Fassungsvermögen. Die kernnächste Schale kann maximal zwei Elektronen aufnehmen, die folgende Schale gliedert sich in zwei Unterschalen, deren eine mit zwei, deren andere mit sechs Elektronen voll besetzt ist. Das Schalenmodell setzt sich so, je nach Anzahl der zugehörigen Elektronen, weiter fort. Die Elektronen auf jeder Schale teilen das gleiche Energieniveau, wobei die vom Atomkern am weitesten entfernten Elektronen über die höchste Energie verfügen.

1.1.2 Bändermodell

Nun stehen aber die einzelnen Atome in flüssigen und besonders in festen Körpern unter ständiger gegenseitiger Beeinflussung. Die schwingenden Atome oder Moleküle kann man sich analog zur mechanischen Schwingungslehre wie gekoppelte Fadenpendel vorstellen. Diese schwingen im gekoppelten Zustand nicht in ihrer Eigenfrequenz, sondern je in verschiedenen Resonanzfrequenzen. Stören sich nun gleichartige Atome aufgrund einer starken Bindung - zum Beispiel in einem Kristall - so entsteht für jeden einzelnen im ungestörten Einzelatom vorkommenden Energiewert eine Vielzahl von diskreten Energieniveaus, die sogenannten Energiebänder.



Zwischen den Energiebändern, also den symmetrisch verbreiterten Energieschalen, bleiben für die Elektronen verbotene Zonen bestehen, die sie nur durch Energiezufuhr, zum Beispiel durch die Absorption eines passenden Lichtquants, überspringen können, sofern im nächst höheren Energieband in energetischer Hinsicht ein Platz frei ist, denn wie die Schalen dürfen auch die Bänder nicht überbesetzt sein.

1.1.3 Elektrische Leitung nach dem Bändermodell

Strom von Elektronen entlang eines Bandes, von Atom zu Atom, kann nur geleitet werden, wenn dieses Band nicht voll besetzt ist, somit die Elektronen Bewegungsfreiheit haben. Da Elektronen immer den niedrigsten Energiezustand anstreben, sind die Bänder mit den niedrigsten Energieniveaus in der Regel voll besetzt. Nur das energetisch oberste Band ist nur teilweise besetzt und dadurch leitend. Man nennt es Leitungsband. Das direkt unter dem Leitungsband befindliche Band heißt Valenzband. Aus ihm können Elektronen, denen Energie zugeführt wird, in das Leitungsband überspringen.

Beim Isolator ist das Valenzband voll besetzt, das Leitungsband dagegen gar nicht, zudem ist die verbotene Zone zwischen den beiden Bändern zu groß um von einem Elektron überbrückt zu werden. Dadurch ergibt sich die isolierende Funktion.

Beim Leiter dagegen überlappen sich Leitungs- und Valenzband und bilden eine Einheit, die zur Hälfte mit Elektronen gefüllt ist. Es ist immer die gleiche Anzahl an Elektronen am Stromfluss beteiligt. Deshalb ist die elektrische Leitung ideal.

Der reine Halbleiter hat wie der Isolator ein volles Valenzband und ein leeres Leitungsband. Jedoch beträgt bei ihm der Energieunterschied, den die verbotene Zone zwischen Valenz- und Leitungsband darstellt, weniger als drei Elektronenvolt. Bei Zufügung von Energie können die Elektronen so den Abstand überbrücken und in das Leitungsband gelangen. Dabei wird elektrische Leitung sowohl im Leitungsband durch die wandernden Elektronen, als auch im Valenzband durch die sogenannten Elektronenlöcher ermöglicht. Der genaue energetische Abstand, die sogenannte Bandlücke ist charakteristisch für einen Werkstoff.



1.2 Leitungsmechanismen in Halbleiterkristallen

1.2.1 Eigenleitung

Die Atombindung von Halbleiterkristallen wie Germanium oder Silizium ist die eines Gitters. Die beiden Elemente sind im Periodensystem Mitglied der vierten Gruppe, das heißt sie besitzen vier Valenzelektronen. In einem dreidimensionalen Gitter fügen sich die einzelnen Atome so zusammen, dass jedes Atom mit jedem seiner vier Nachbaratome ein Elektronenpaar teilt, um die oberste Teilschale zu einer edelgasförmigen Elektronenkonfiguration abzusättigen, man spricht von einer kovalenten Bindung. Diese typische Struktur ist in Abbildung 1-1 zu erkennen.

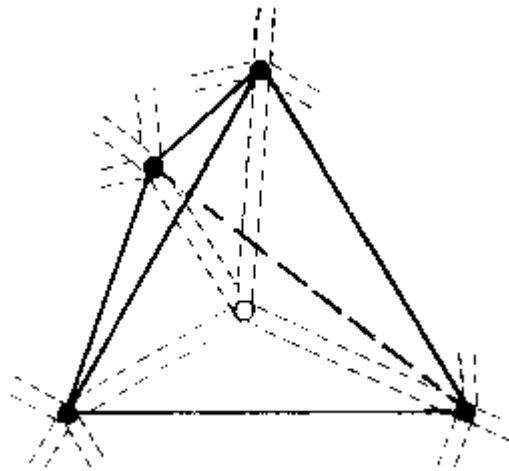


Abbildung 1-1: Siliziumkristallaufbau

Die Halbleitergitter sind bei einer Temperatur von 0 K starre Gebilde, die wie Isolatoren wirken. Bei Temperaturen oberhalb des absoluten Nullpunkts führen die Atome jedoch Schwingungen um ihre Ruhelage aus (Braun'sche Molekularbewegung), den Elektronen wird thermische Energie zugeführt und sie können die kovalente Bindung verlassen oder, nach der oben genannten Theorie des Bändermodells gesagt, vom Valenzband in das Leitungsband übergehen. Dabei entsteht einerseits ein freies Elektron im Leitungsband, andererseits noch zusätzlich eine Bindungslücke im Gitter, beziehungsweise ein energetischer Freiraum im Valenzband. Man spricht dann von Paarbildung oder Generation, während der gegenläufige Vorgang Rekombination genannt wird. Dieser Vorgang ist in Abbildung 1-2 sichtbar. Weiterhin heißt die



Leitung im Valenzband durch Verschiebung von Elektronenlöchern, gleichwertig positiven Ladungsträgern, p-Leitung und die gewöhnliche Elektronenleitung im Leitungsband n-Leitung.

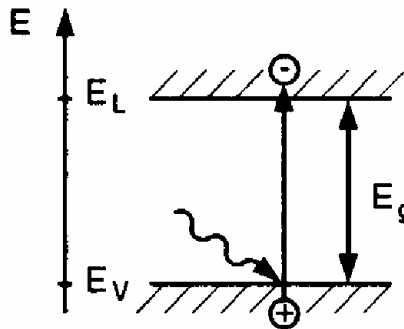


Abbildung 1-2: Paarbildung

1.2.2 Störstellenleitung durch Dotierung

Allein durch Erwärmung des Halbleitermaterials ist also eine Leitung elektrischen Stroms durch positive wie negative Ladungsträger möglich. Die auf diese Weise ermöglichte Eigenleitung ist jedoch verschwindend gering im Vergleich zum Leitungseffekt, den man erhält, wenn man den Halbleiter gezielt verunreinigt. Bei diesem Vorgang, der Dotierung, werden durch thermische Diffusion Fremdatome niedriger oder höherer Wertigkeit in das Gitter eingebaut. Atome höherer Wertigkeit, Donatoren, haben für die kovalente Bindung im Gitter ein Valenzelektron zuviel, das so zur n-Leitung zur Verfügung steht, Atome niedrigerer Wertigkeit, Akzeptoren, haben umgekehrt ein Valenzelektron zu wenig, damit eine Bindungslücke als positiver Ladungsträger für die p-Leitung im Gitter zurückbleibt. So erzeugt man entweder durch die p-Dotierung zur p-Leitung des Halbleitermaterials oder eben durch die n-Dotierung für die n-Leitung eine künstliche Störstellenleitung.

Die künstlich eingebauten Störstellen sind anders als die Valenzelektronen des reinen Halbleiters nur durch elektrostatische Kräfte an die Atome gebunden. Das hat auch energetische Auswirkungen. Das Fermi-niveau liegt dadurch beim Donator dicht unterhalb des Leitungsbandes. Man benötigt also nur eine geringe Energiezufuhr, um Elektronen in das Leitungsband zu übertragen und so n-Leitung zu erzeugen. Ebenso beim Akzeptor, bei dem das Fermi-niveau nur unwesentlich über dem Valenzband liegt.



1.3 pn-Übergang

Dotiert man einen Halbleiter von der einen Seite her mit einem dreiwertigen Stoff (p-leitend) und von der anderen Seite her mit einem fünfwertigen Stoff (N-leitend), so entsteht der sogenannte pn-Übergang (eigentlich der pn-Homoübergang, da das Ausgangsmaterial gleich war, beim Heteroübergang, werde zwei unterschiedliche Werkstoffe zusammengebracht, von denen eines p-, das andere n-dotiert ist). Dadurch fließen die Elektronen aus dem n-Material in das p-Material, wo sie mit den dort zahlreich vorhandenen Löchern (Majoritätsträger im p-Bereich) schnell rekombinieren. Gleichzeitig fließen Löcher aus dem p-Material in das n-Material, wo die Elektronen Majoritätsträger sind und daher schnell die übertragenen Löcher rekombinieren. Dieser Ladungsträgerfluss wird Diffusionsstrom genannt. Da durch diese Rekombinationen zwar die Valenzen der Dotierungsatome abgesättigt werden, nicht aber die Kernladungen, entstehen im p-Material negative Raumladungen (p-Material nimmt Elektronen auf) und im n-Material positive Raumladungen (n-Material gibt Elektronen ab). Dadurch entsteht ein elektrisches Feld zwischen diesen beiden Bereichen, wodurch ein Driftstrom erzeugt wird, der dem Diffusionsstrom entgegenwirkt. Den Bereich, in dem sich dies abspielt, nennt man Raumladungszone oder Sperrschicht (vgl. Abbildung 1-3).

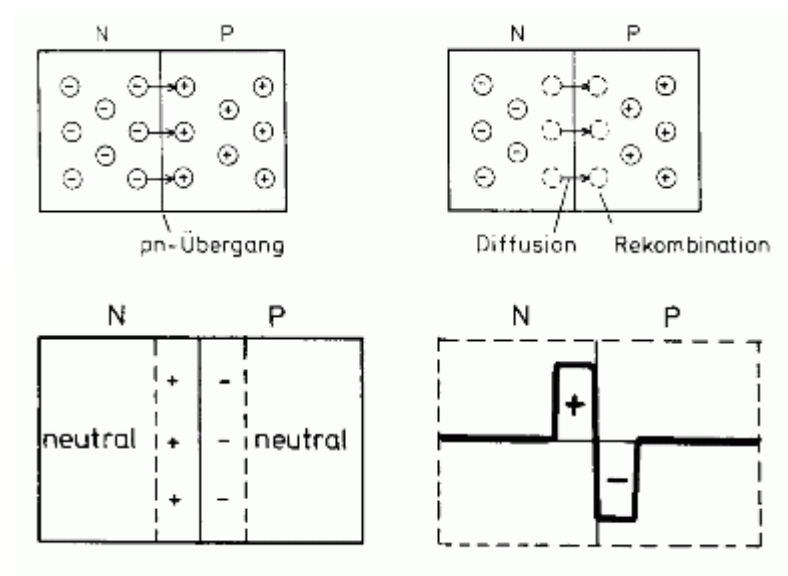


Abbildung 1-3: Ausbildung der Raumladungszone

Den Fluss zwischen dem p- und dem n-Material kann man sich vorstellen wie der Flüssigkeitsausgleich in kommunizierenden Röhren, wo sich die Flüssigkeitssäulen ausgleichen, bis sie die gleiche Höhe erreichen. Beim pn-Übergang fließen so lange Elektronen, bis sich die Fermienergie ausgeglichen haben. Dadurch verschieben sich die Energieniveaus des Valenzbandes und des Leitungsbandes der zusammengeführten Halbleiter so weit, dass das Fermienergie auf gleiche energetische Höhe, kommt. An diesem Punkt sind Diffusions- und Driftstrom gleich groß und entgegengesetzt. Davon ausgehend verschieben sich die Energieniveaus des Valenz- und des Leitungsbandes so weit, dass die Energiedifferenzen, die benötigt werden, um vom Fermienergie zum Valenz- oder Leitungsband zu kommen, wieder korrekt sind. Das sieht dann aus wie in Abbildung 1-4 gezeigt.

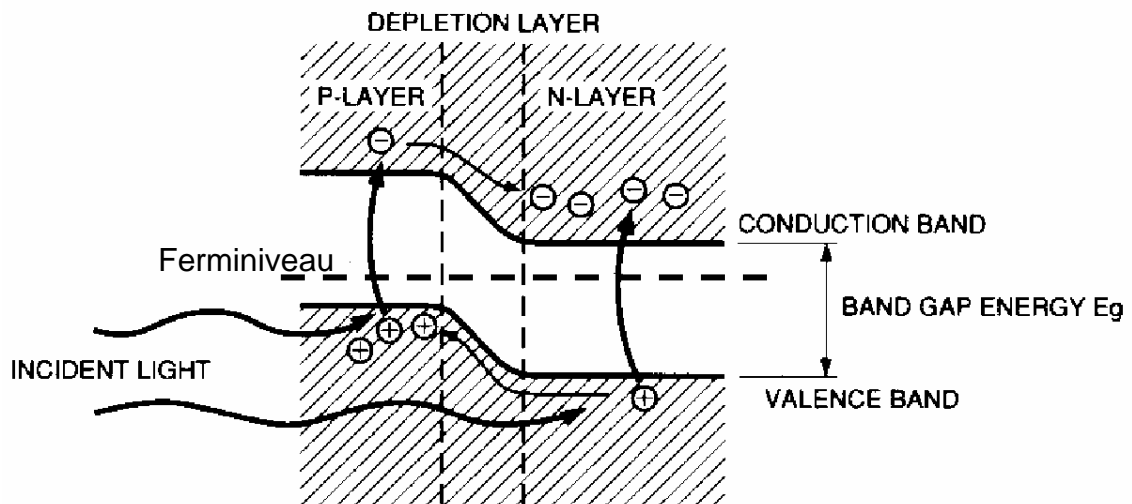


Abbildung 1-4: Energieniveaus beim pn-Übergang

Die Ausdehnung der Raumladungszone sinkt mit zunehmendem Dotierungsgrad der Materialien, da dann der energetische Ausgleich bereits in einem kleinen Gebiet erreicht werden kann.



1.4 Fotoeffekt

1.4.1 Hintergrund

Man unterscheidet zwischen dem äußeren, dem inneren und dem Sperrschicht-Fotoeffekt. Der äußere Fotoeffekt ist für Fotodioden nicht von Bedeutung.

Grundsätzlich erfolgt beim Fotoeffekt eine Paarbildung von einem Elektron und einem Loch durch Photonenabsorption (Lichteinstrahlung). Das Elektron wird dadurch energetisch in das Leitungsband angehoben, während ein „positives“ Loch (Defektelektron) im Valenzband verbleibt. Das Photon muss dazu eine bestimmte Mindestenergie aufweisen, um das Elektron vom Fermi-niveau bis zum Leitungsband zu bringen: $E_{\min} = E_L - E_{Fe} = h \cdot \nu$. Das ist der innere Fotoeffekt. Ist die Energie größer, so gibt das Elektron diese zusätzliche Energie so lange ab, bis es wieder auf dem Niveau des Leitungsbandes ist. Ist die Energie sehr groß (E_{vac}), kann das Elektron aus dem Material austreten. In diesem Fall spricht man vom äußeren Fotoeffekt.

Befindet sich nun durch Photonenbeschuss ein Elektron im Leitungsband in der p-Zone, so wird es versuchen, eine energetisch günstigere Lage einzunehmen. Die wird ihm im Leitungsband des n-Materials angeboten. Das Elektron ist also bestrebt, dorthin zu wandern. Geschah die Paarbildung sogar in der Raumladungszone, dann wird das Elektron durch das elektrische Feld in der Raumladungszone in 100 % aller Fälle in den n-Bereich wandern (Ladungsträgertrennung). Gleichzeitig bewegt sich das Loch, das in der Raumladungszone entstanden ist, in das n-Material, da für die Löcher die energetische Skala anders herum verläuft. Diesen Fall einer Kombination des inneren Fotoeffekts zusammen mit einer hundertprozentigen Ladungsträgertrennung nennt man Sperrschicht-Fotoeffekt.

Findet die Paarbildung hingegen in der n- oder p-Zone statt, dann hängt es von der Richtung ab, die das Elektron, beziehungsweise das Loch einschlägt, ob es die Raumladungszone erreicht, und in den jeweils anderen Bereich beschleunigt wird, oder nicht. Die Ladungsträgertrennung liegt hier unter 100 %. Je weiter man sich von der Raumladungszone entfernt, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Elektronen noch die Raumladungszone erreichen und damit von „ihren Löchern“ getrennt werden.

In Abbildung 1-4 wurde dieser Vorgang bereits schematisch dargestellt.



1.4.2 Anwendung in der Fotodiode

Eine Anwendung dieses Fotoeffekts findet sich unter anderem in der Fotodiode. Die technische Ausführung sieht schematisch wie in Abbildung 1-5 aus.

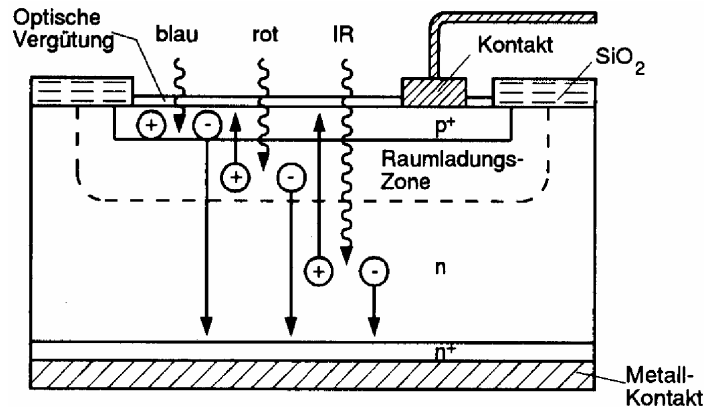


Abbildung 1-5: Schematischer Aufbau einer Fotodiode mit innerem fotoelektrischen Effekt und Trennung der erzeugten Elektron-Loch-Paare

Ein Maß für die Anzahl der gewanderten Elektronen und Löcher ist der Fotostrom (Kurzschlussstrom). Er lässt sich mittels Multimeter messen. Ebenso kann die Fotospannung (Klemmenspannung) gemessen werden.

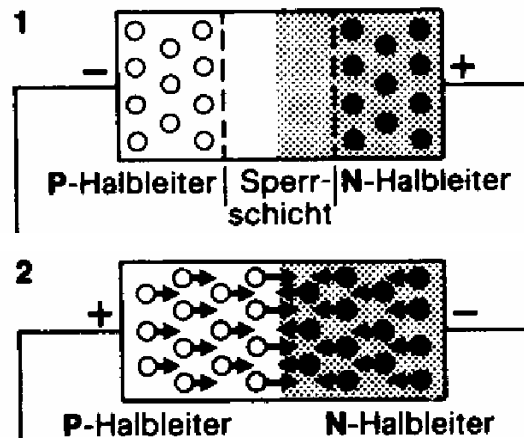


Abbildung 1-6: pn-Übergang mit äußerer Spannung

- 1 Sperrfall: Minuspol am p-Gebiet und Pluspol am n-Gebiet verbreitern die Raumladungszone: Stromfluss bis auf geringen Rest gesperrt (rührt von Minoritätsträgern)
- 2 Durchlassfall: Pluspol am p-Gebiet und Minuspol am n-Gebiet baut Sperrschicht ab: Ladungsträger überschwemmen pn-Übergang, es fließt ein großer Strom

2 Versuch

2.1 Versuchsbeschreibung

Im Praktikumsversuch „Fotodiode“ sollte der Umgang und die Funktionsweise von Fotodioden nähergebracht werden. Dazu sollten bei einer bestimmten Fotodiode die Kennwerte Fotostrom und Fotospannung gemessen werden, wobei in einem ersten Versuch die Abhängigkeit von der Wellenlänge λ des auf die Fotodiode einfallenden Lichts untersucht wurden, in einem zweiten Versuch die Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke E , und zuletzt die Abhängigkeit vom Einfallswinkel α .

2.2 Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Versuche war folgender Aufbau bereits vorbereitet:

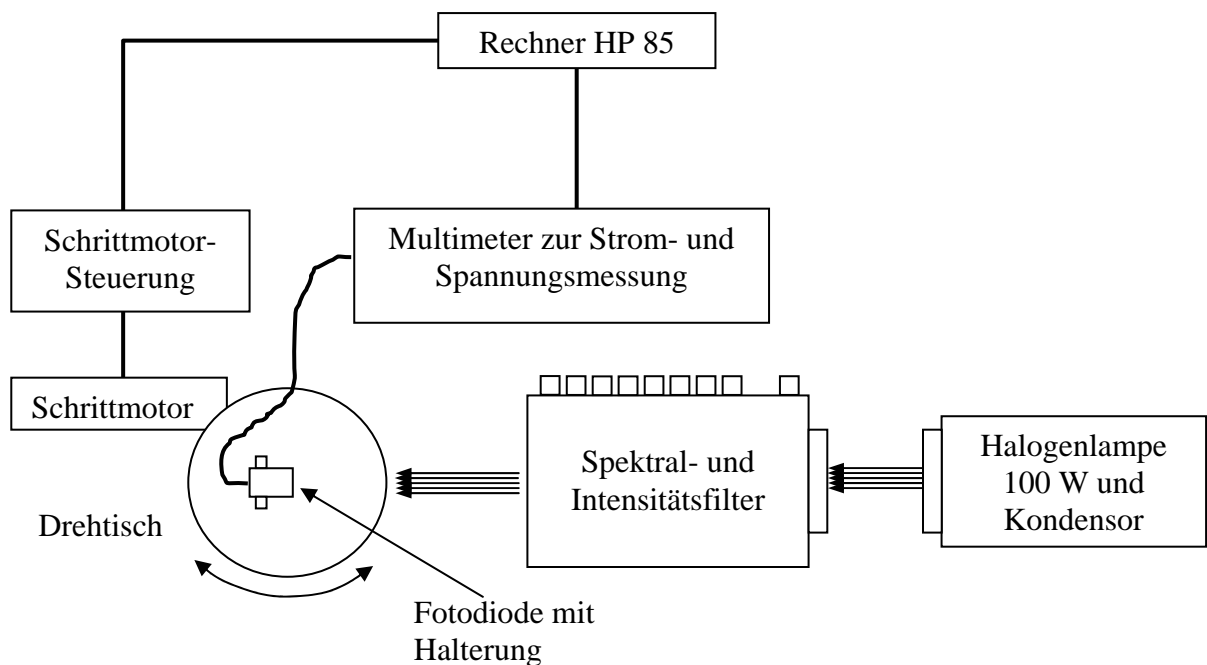


Abbildung 2-1: Versuchsanordnung

Der Rechner HP 85 steuerte den Ablauf der Versuche und nahm zusätzlich zu den handschriftlichen Aufzeichnungen das jeweilige Messprotokoll auf. In seinem Programm waren



die Anweisungen zum schrittweisen Vorgehen klar und deutlich formuliert, so dass gemäß dieser Anleitung die jeweiligen Filter im Filterkasten manuell in den Lichtgang hinein beziehungsweise aus dem Lichtgang hinausgeschoben werden konnten, um die Messung durchzuführen. Beim letzten Versuch, der Untersuchung der Abhängigkeit des Fotostroms und der Fotospannung vom Lichteinfallswinkel, wurde der Drehtisch über den Schrittmotor und die Schrittmotorsteuerung automatisch durch den Rechner angesteuert.

Bei unserer Versuchsdurchführung am 08.11.2000 verwendeten wir eine Fotodiode vom Typ Hamamatsu S 1226-8BK, einer Silizium-Photodiode mit pn-Übergang und einer aktiven Fläche von 33 mm².



7 Literaturverzeichnis und Quellenangabe

Bader, Franz und Friedrich Dorn. Physik-Oberstufe. Gesamtband 12/13. Hannover: Schroedel, 1986.

Pientka, Herbert. Leitungsvorgänge in Metallen und Halbleitern. Hrsg. von Gerd Harbeck. 2. Auflage. Stuttgart. Metzler, Poeschel. 1979.

Schröder, Heinz und Christian Schulte. Physik. Elektrische Leitungsvorgänge. Hrsg. von Friedrich Bergmann und Heinz Schröder. 1. Auflage. Frankfurt am Main. Sauerländer. 1979

Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Bosch, 22. Auflage, 1995

Technische Dokumentation, Photodiodes, Hamamatsu, 1996

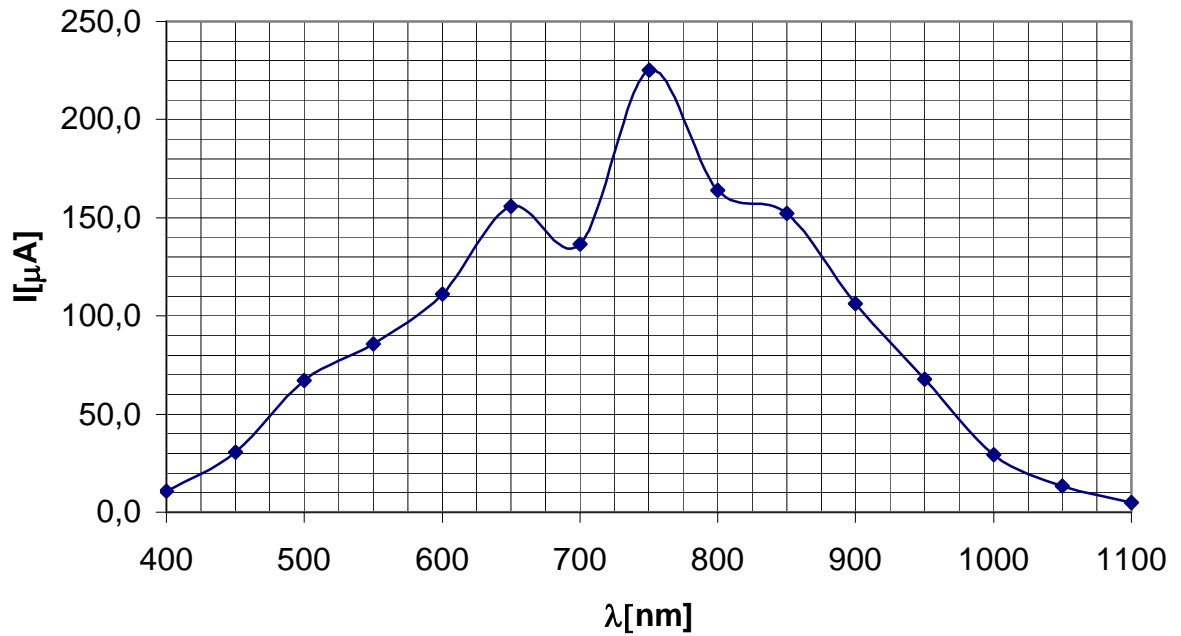
Optik und Atomphysik, W. Mückenheim, FHA, 1996

Internet

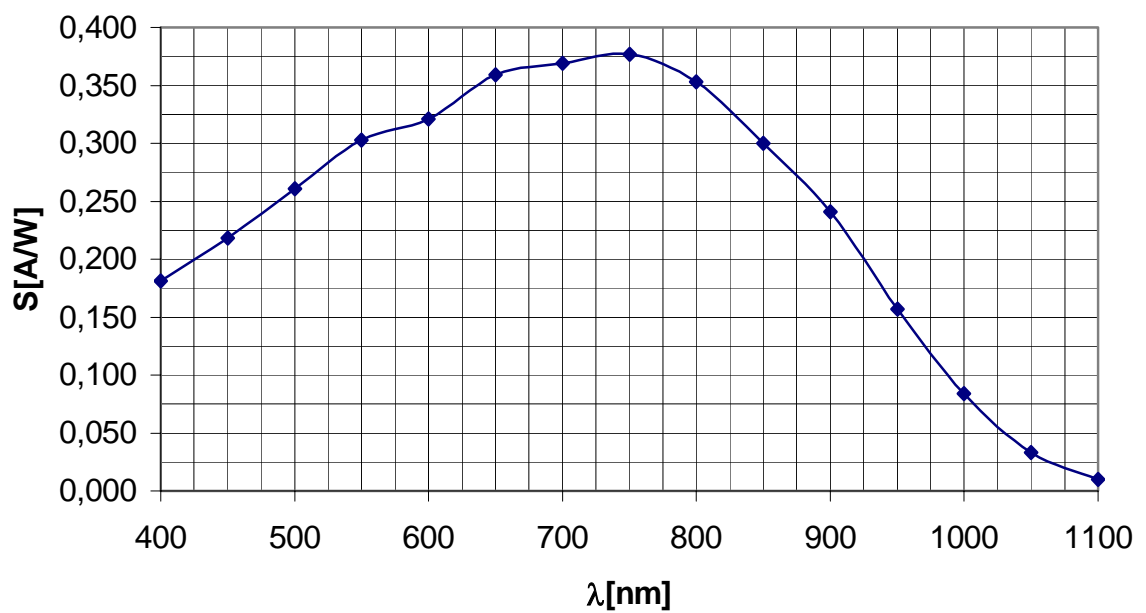


3. Versuchsauswertung - Diagramme

Kurzschlussstrom (I) als Funktion der Wellenlänge (λ)

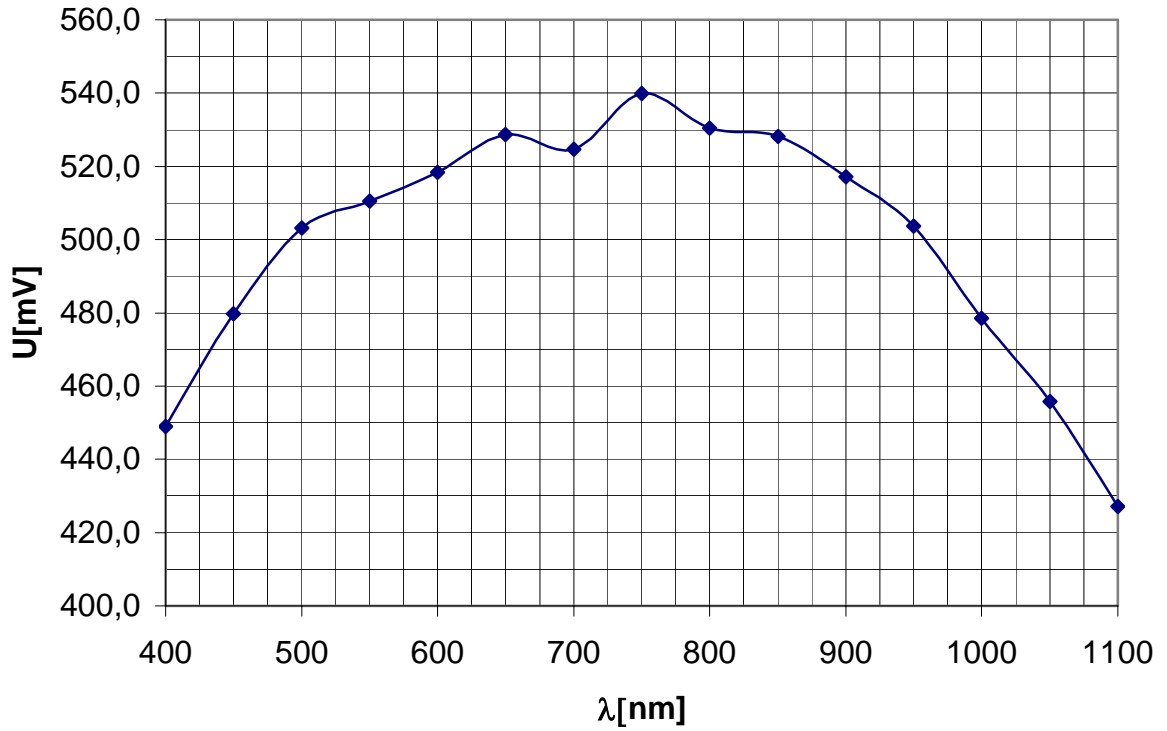


Spektrale Empfindlichkeit (S) als Funktion der Wellenlänge (λ)

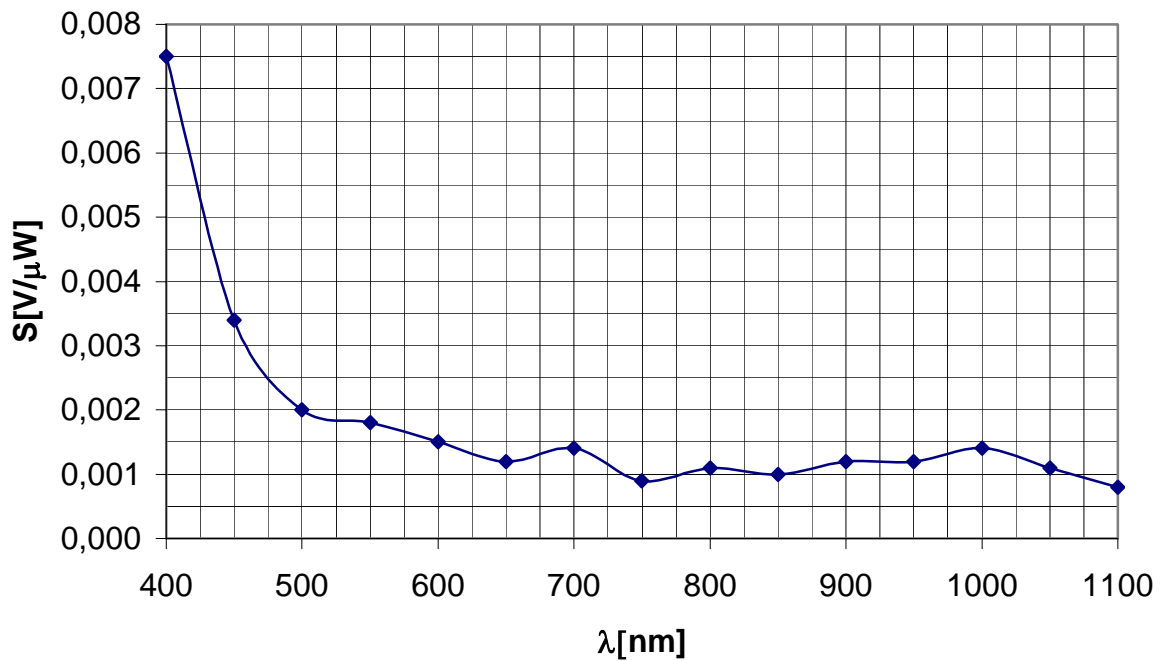




Offene Klemmenspannung (U) als Funktion der Wellenlänge (λ)

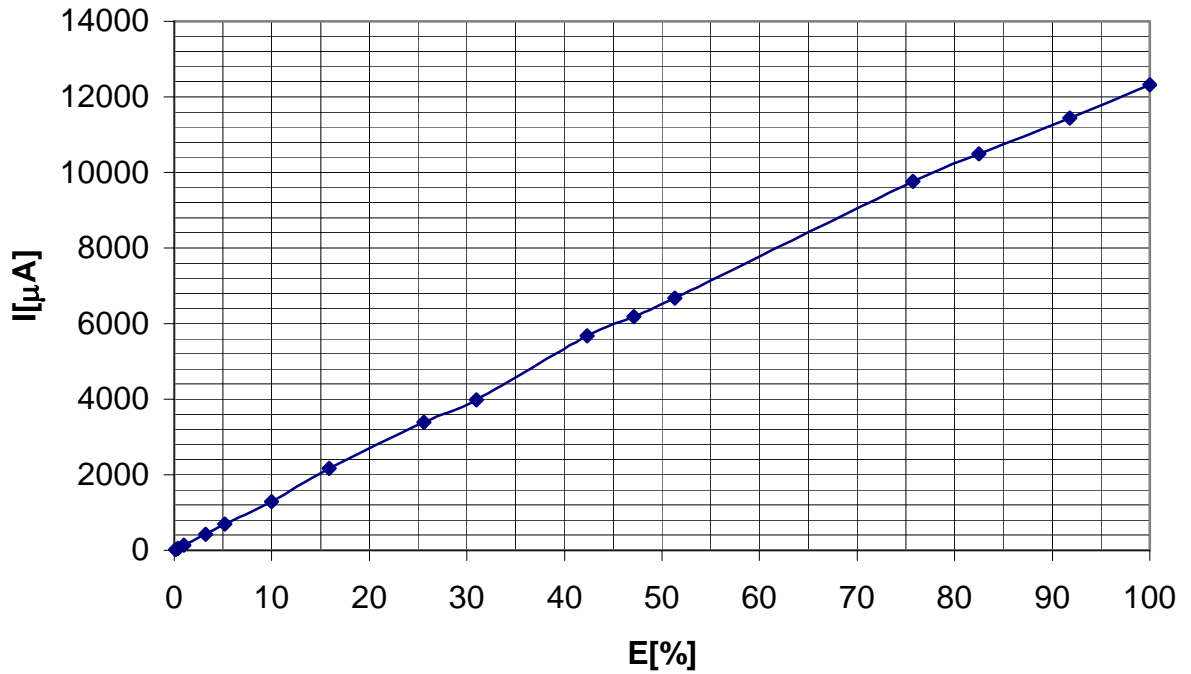


Spektrale Empfindlichkeit (S) als Funktion der Wellenlänge (λ)

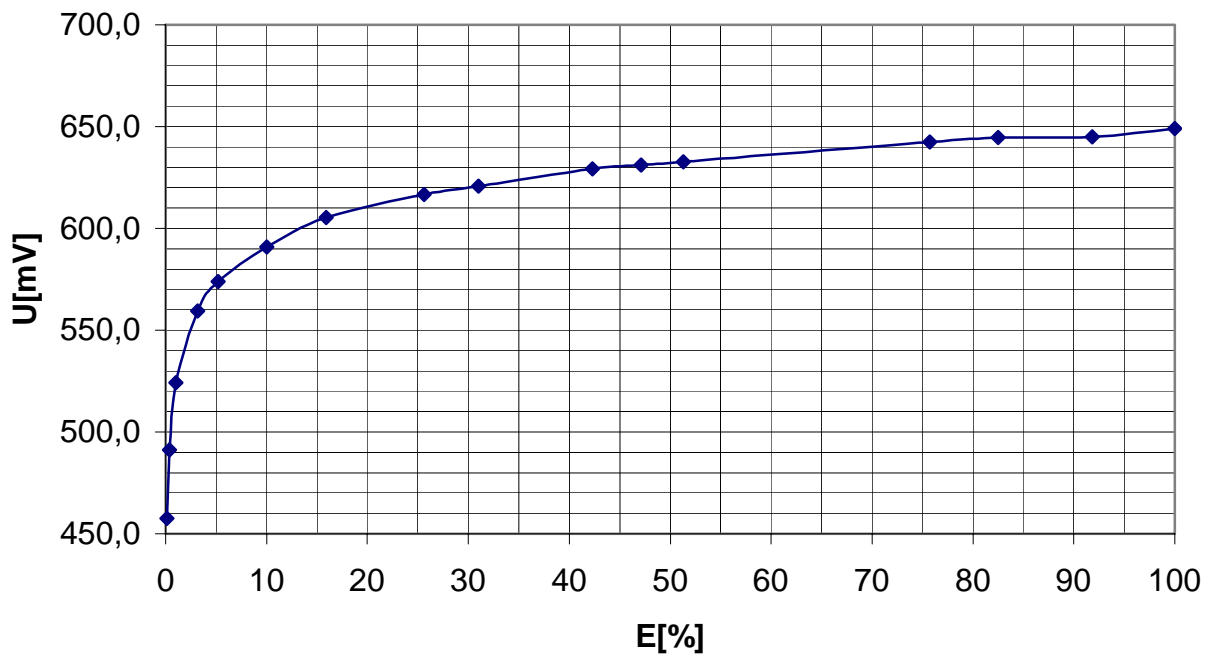


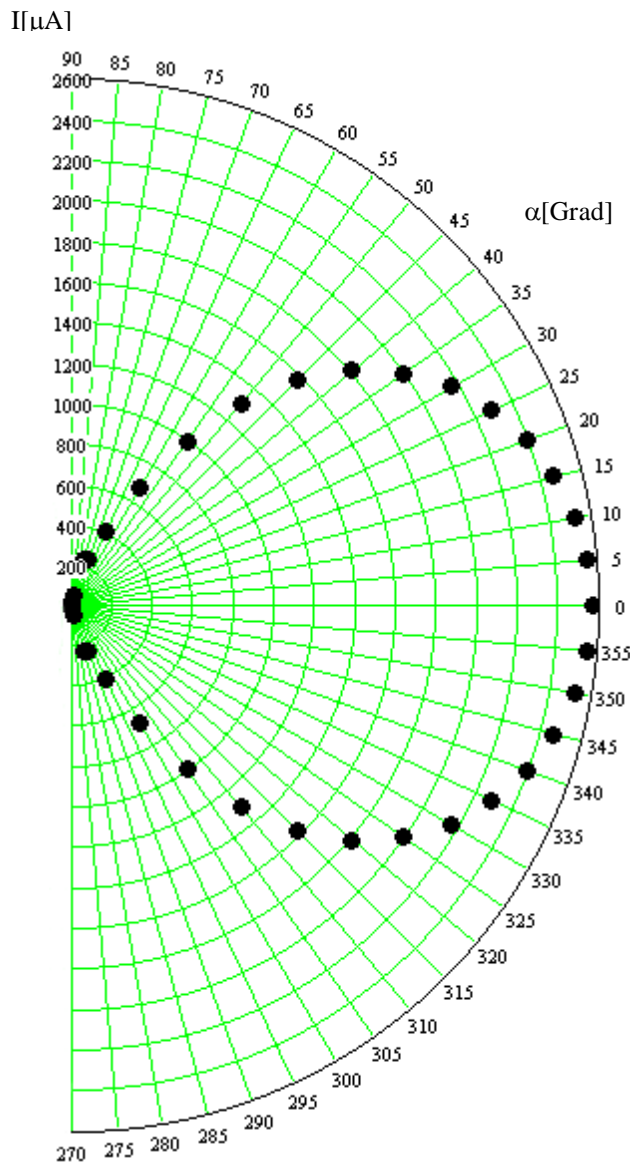


Kurzschlussstrom (I) als Funktion der Bestrahlungsstärke (E)

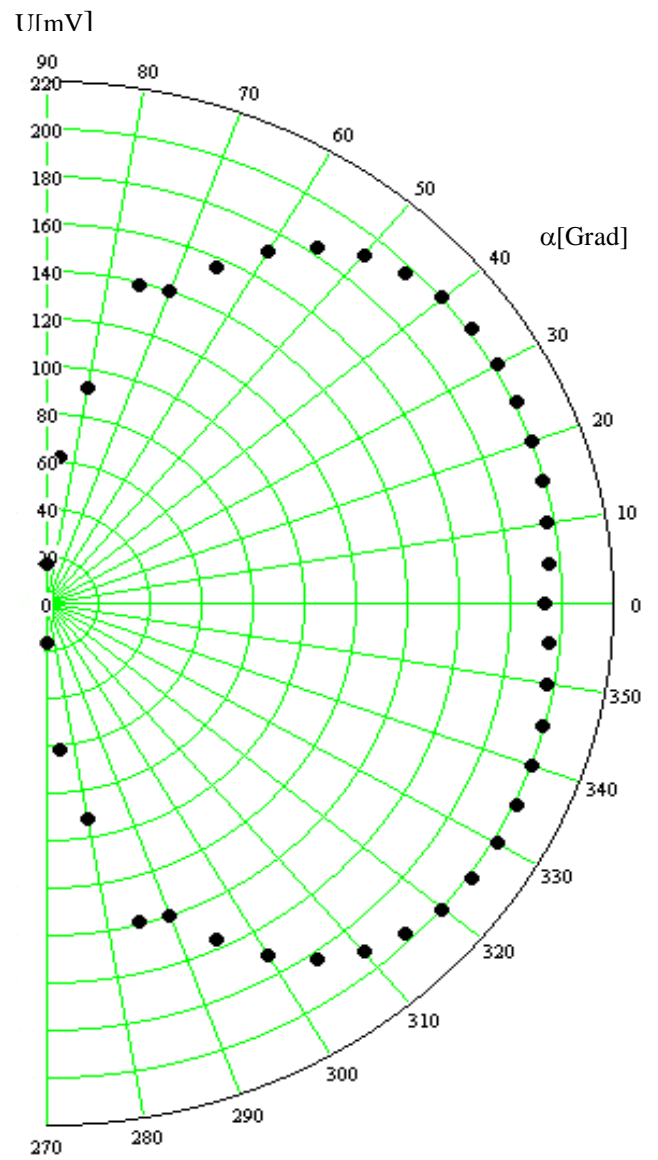


Offene Klemmenspannung (U) als Funktion der Bestrahlungsstärke (E)





Kurzschlussstrom (I) als Funktion des
Lichteinfallwinkels (α)



Offene Klemmenspannung (U) als Funktion des
Lichteinfallwinkels (α)



4. Diskussion der Messkurven

4.1. Variation der Wellenlänge λ [nm]

4.1.1. Kurzschlussstrom I [μ A] und spektrale Empfindlichkeit S [A/W]

Der Kurzschlussstrom hat bei einer Wellenlänge von 750 nm sein Maximum. Die Kurve zeigt in ihrem Verlauf bei 700 nm eine Unstetigkeit. Die spektrale Empfindlichkeit steigt mit zunehmender Wellenlänge stetig an, um ebenfalls bei 750 nm (rot) ihr Maximum zu erreichen und dann stetig abzufallen. Der gemessene Kurvenverlauf ist mit dem vom Hersteller angegebenen Verlauf vergleichbar.

4.1.2. Offene Klemmenspannung U [mV] und spektrale Empfindlichkeit S [V/ μ W]

Die offene Klemmenspannung nimmt mit der Wellenlänge zu und erreicht bei 750 nm ihr Maximum. Jedoch zeigt sich bei 700 nm ein Einbruch im Kurvenverlauf. Die spektrale Empfindlichkeit hat ihrem Maximalwert bei einer Wellenlänge von 400 nm (violett). Mit zunehmender Wellenlänge zeigt sich ein asymptotisches Abfallen der Kurve bis zu einem Wert von $S = 0.001$ V/ μ W.

4.2. Variation der Bestrahlungsstärke E [%]

4.2.1. Einfluss auf Kurzschlussstrom I [μ A]

Der Kurzschlussstrom steigt linear mit der Beleuchtungsstärke an. Die Fotodiode lieferte bei maximaler Beleuchtung durch die Halogenlampe einen Kurzschlussstrom von $I = 12315$ μ A.

4.2.2. Einfluss auf Klemmenspannung U [mV]

Die offene Klemmenspannung über der Beleuchtungsstärke aufgetragen zeigt einen Kurvenverlauf, der dem einer steigenden Logarithmuskurve nahe kommt. Bei maximaler Beleuchtungsstärke wird eine Spannung von $U = 649$ mV erzeugt.



4.3. Variation des Einfallswinkels α [Grad] der optischen Strahlung

4.3.1. Einfluss auf Kurzschlussstrom I [μ A]

Mit zunehmenden Einfallswinkel des Lichtstrahls auf die Fotodiode wird der erzeugte Kurzschlussstrom geringer. Bei senkrecht auftreffender Strahlung auf den Halbleiterkristall wird der maximale Kurzschlussstrom von $I = 2567.6 \mu\text{A}$ erzeugt. Bei einem Einfallswinkel von 30 Grad liegen noch 85% des maximalen Kurzschlussstroms an. Bei einem Einfallswinkel von 75 Grad zeigt die Kurve eine Unstetigkeit. Der verstärkte Stromfluss in dieser Stellung könnte vielleicht durch Reflektion von Licht an der zylindrischen Einfassung des Halbleiterkristalls verursacht werden.

4.3.2. Einfluss auf Klemmenspannung U [mV]

Der Verlauf der Klemmenspannung über den Einfallswinkel zeigt eine andere Form als der des Kurzschlussstroms. Die Spannung steigt mit dem Vergrößern des Einfallswinkels zunächst an und erreicht beim Einfallswinkel von 30 Grad ihr Maximum von $U = 202.2 \text{ mV}$. Bis in den Bereich des Einfallswinkel von ca. 60 Grad werden noch 85% der maximalen Klemmenspannung erzeugt. Anschließend fällt die Spannung allmählich ab. Bei einem Einfallswinkel von 75 Grad zeigt sich ähnlich wie beim Kurzschlussstrom eine Unstetigkeit in Form von erhöhten Spannungsanfall.

5. Zusammenfassung der Messergebnisse

Nach der Auswertung der Messungen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Fotodioden zeigen ein stark von der Wellenlänge des Lichtes abhängiges Verhalten. Sowohl die Spannung wie auch der erzeugte Strom haben bei einer bestimmten Wellenlänge des Lichtes ihren maximalen Wert. Durch die Verwendung von kohärenten Quellen die Licht mit eben diesen Wellenlängen erzeugen, können Fotodioden sehr effektiv betrieben werden.
- Fotostrom und Fotospannung erhöhen sich mit steigender Bestrahlung. Insbesondere zum Messen der Beleuchtungsstärke eignet sich der Fotostrom, da zwischen den Größen lineares Verhalten besteht.



- Bei der Positionierung der Photodiode sollte darauf geachtet werden, dass das Licht möglichst senkrecht auf die Bestrahlungsfläche fällt, um die Diode effektiv zu betreiben.

6. Anhang

- Praktikumsanleitung
- Versuchsprotokolle