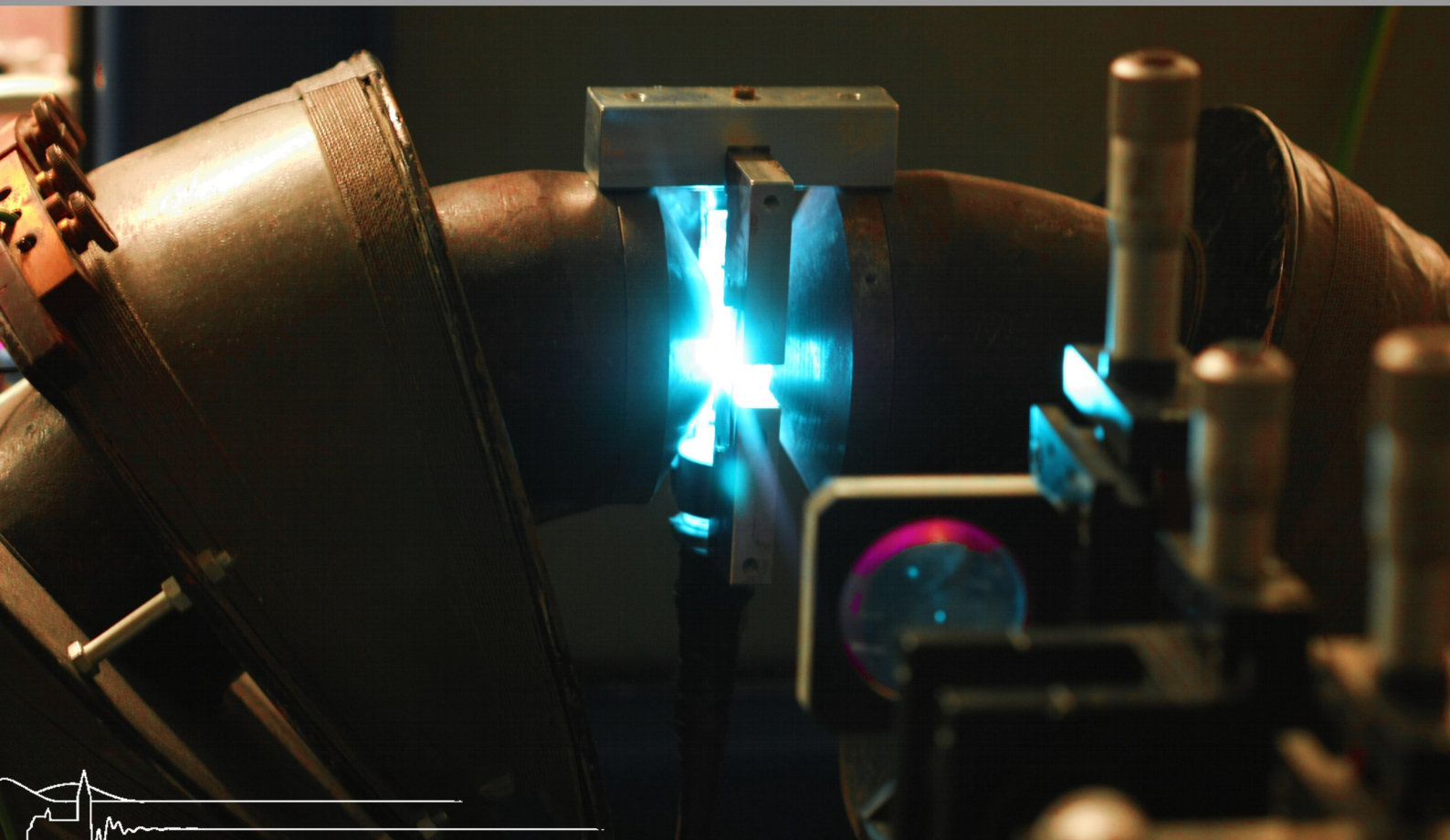




Universität Freiburg

Versuchsanleitung
**Fortgeschrittenen
Praktikum**
Teil I

Halbleiter



Halbleiter

INSTITUT FÜR MATHEMATIK UND PHYSIK
ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT
FREIBURG IM BREISGAU

26. MÄRZ 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Überblick über den Versuch	1
2	Vermessung der Bandlücke	2
2.1	Vorwort	2
2.2	Vorkenntnisse	2
2.3	Aufgabenstellung	2
2.4	Versuchsbeschreibung	3
2.5	Durchführung/Auswertung	5
3	Das Haynes & Shockley-Experiment	8
3.1	Vorwort	8
3.2	Vorkenntnisse	8
3.3	Aufgabenstellung	8
3.4	Versuchsbeschreibung	9
3.5	Durchführung/Auswertung	9
4	Halbleiterdetektoren	12
4.1	Vorwort	12
4.2	Vorkenntnisse	12
4.3	Aufgabenstellung	12
4.4	Versuchsbeschreibung	13
4.5	Durchführung/Auswertung	13
5	Geräteliste	15
6	Literaturwerte	15
7	Literatur	16

1 Einleitung

1.1 Überblick über den Versuch

Die Zusammenstellung von Experimenten soll Funktionsweise und Anwendung von Halbleiterdetektoren, hier Silizium als reiner und Kadmiumtellurid als Verbindungshalbleiter, näher bringen.

Zuerst soll in **Teil I** die Bandlückenenergie vermessen werden. Dieses grundlegende Charakteristikum des Materials bestimmt unter anderem die Auflösung des Detektors, da diese die minimale Energie vorgibt, für welche eine potentielle Signalantwort durch Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares entstehen kann.

In **Teil II** werden die Eigenschaften untersucht, welche sich aus Restriktionen der Geometrie beziehungsweise Limitationen des Materials ergeben. Da nach Freisetzung von Ladungsträgern diese in ein am Detektor angeschlossenes Messgerät abgeführt werden müssen, liegt das Interesse darin, Kenntnis über Beweglichkeit gleichsam wie Rekombinationsrate der Elektronen zu erlangen. Durch diese Parameter wird die Menge an Ladung definiert, welche an der Kontaktierung noch nachweisbar sind.

Schließlich wird in **Teil III** die Eignung des Gesamtsystems des als Detektor verwendeten Halbleiters erprobt. Hierzu wird das Spektrum einer radioaktiven Quelle aufgenommen. Als Gütefaktor dient die Energieauflösung, gegeben durch die Halbwertsbreite der erfassten Linien.

2 Vermessung der Bandlücke

2.1 Vorwort

Die Bandlückenenergie E_g ist die wichtigste Kenngröße eines Halbleiters. Diese Energie wird benötigt, um ein Elektron vom gebundenen Zustand des Valenzbands in den quasi-freien Zustand des Leitungsbands anzuregen. Dieser Versuch bietet einen guten Einstieg zum Verständnis und zu experimentellen Tätigkeiten rund um Halbleiter.

2.2 Vorkenntnisse

Informieren Sie sich über folgende Themen:

- Bändermodell (Valenzband, Leitungsband, Bandlücke)
- Indirekte Halbleiter (Ind. Übergang, Phononen)
- Extrinsische Halbleiter
- Transmission/Absorption von Strahlung in Festkörpern
- Interferenz von Photonen (optisches Gitter, Spektrometer)
- Lock-In Verstärker

2.3 Aufgabenstellung

- Optimieren Sie den Strahlengang für das Licht des Spektrometers. Beachten Sie dabei, dass das optische Gitter und der verwendete Filter zu der ausgewählten Halbleiterprobe passen.
- Verwenden Sie die Software 'LoggerPro', um bei jeder der beiden zu Verfügung stehenden Halbleiterproben (Silizium, Germanium) ein Absorptionsspektrum und ein Transmissionsspektrum aufzunehmen.
- Führen Sie für beide Spektren eine Untergrundmessung durch.
- Vermessen Sie die Strahlungsleistung der Lampe + Filter.
- Überlegen Sie sich eine Möglichkeit, um Fehlerbalken auf die Messungen der Spektren zu errechnen.
- Bestimmen Sie den Wert der Bandlückenenergie von Germanium und Silizium aus dem Transmissionsspektrum.
- Bestimmen Sie den Wert der Bandlückenenergie von Germanium und Silizium aus dem Absorptionsspektrum.

2.4 Versuchsbeschreibung



Abbildung 1: Die zentralen Bestandteile des Halbleiterversuches

Um die Bandlückenenergie E_g zu bestimmen, wird eine Halbleiterprobe mit Photonen bestrahlt, deren Energie von einem Spektrometer vorgegeben wird. Ist die Energie der Photonen groß genug ($> E_g$) um ein Elektron vom gebundenen Zustand des Leitungsbands in den quasi-freien Zustand des Leitungsbands zu heben, so wird es absorbiert. Reicht die Energie des Photons dagegen nicht aus ($< E_g$), so kommt es zu Transmission. Die Absorption der Photonen wird durch den Strom im Halbleiter gemessen, die Transmission von einem hinter der Halbleiterprobe liegenden Pyrodetektor registriert.

Im Folgenden werden die einzelnen Geräte zur Erzeugung und Messung des Absorptionsspektrums bzw. des Transmissionsspektrums beschrieben. Näheres ist der Staatsexamensarbeit zu entnehmen.

Das Spektrometer

Das Spektrometer besteht aus einer V-förmigen optischen Bank. Auf dem ersten Arm dieser Bank ist eine Lampe angebracht, welche mittels einer Linse ($F = 100 \text{ mm}$) Licht parallel in Richtung eines optischen Gitters wirft. Das optische Gitter ist auf einer speziellen Halterung drehbar montiert. Auf der Winkelscheibe lässt sich zu jedem Zeitpunkt der Anstellwinkel ϕ des optischen Gitters ablesen; diese Information gelangt auch mittels einer Schnittstelle an den Auswertungs-Computer. Durch das optische Gitter kommt es zu konstruktiver Interferenz. Für die Energie E der Photonen, welche auf die Halbleiterprobe (diese befindet sich auf dem zweiten Arm der optischen Bank) treffen, gilt:

$$E(\phi) = \frac{hc}{2d \sin(\phi) \cos(\psi)} \quad (1)$$

(Nur Interferenz erster Ordnung ist von Bedeutung: $n = 1$)

- ϕ : Anstellwinkel des optischen Gitters,
- h : Planck-Konstante,
- c : Lichtgeschwindigkeit,
- d : Gitterkonstante,
- ψ : Halber Öffnungswinkel der Bank = $7,5^\circ$.

Messung der Absorption

Die Messung der Absorption der Photonen erfolgt durch Messung des elektrischen Widerstands der Proben. An die Probe wird mittels zweier elektrischer Kontakte eine Spannung angelegt (diese Spannung wird von einem Strom-Spannungswandler, der in den Lock-In Verstärker eingebaut ist, erzeugt). Übersteigt die Energie der Photonen die Bandlückenenergie, so werden von den Photonen viele Ladungsträger erzeugt und es kommt zu einem starken Anstieg des Probenstroms.

Messung der Transmission

Die Messung der Transmission erfolgt durch einem sog. Pyrodetektor, der sich hinter der Halbleiterprobe befindet. Er besteht aus einem Plattenkondensator, in den ein Lithium-Tantalat-Blättchen als Dielektrikum eingebracht wurde. Ein 'Chopper' (Rotor), der vor die Lampe montiert ist, erzeugt Lichtpulse einer Frequenz von ca. 70 Hz. Diese wechselnde Bestrahlung veranlasst auch eine wechselnde Dielektrizität des Lithium-Tantalat-Blättchens und damit eine wechselnde Spannung am Kondensator. Dies kann einerseits einfach gemessen werden und erfolgt andererseits unabhängig von der Wellenlänge des eingestrahlt Lichts. Für die Messungen muss daher der Raum nicht extra abgedunkelt werden.

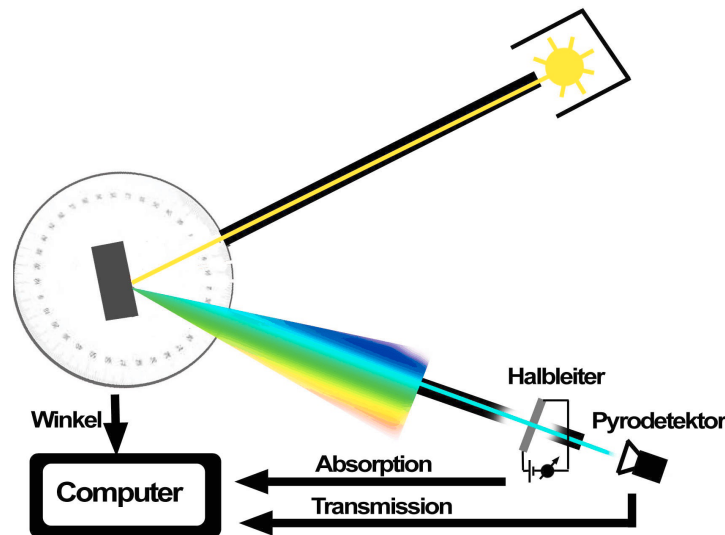


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des Halbleiterversuchs

Filter, optische Gitter und der Lock-In Verstärker

Damit die Messergebnisse möglichst frei von systematischen und statistischen Fehlern sind, gibt es einige Optimierungen. Es stehen zwei verschiedene optische Gitter zur Verfügung. Die Gitterkonstanten sind so gewählt, dass der zu erwartende Interferenzwinkel für Photonen mit $E_{\text{Photon}} = E_g$ bei ca. 40° liegt. Unter einem Winkel von ca. 40° lässt sich aufgrund der hohen Intensität gut messen.

Ebenfalls an die zu erwartenden Bandlückenenergien angepasste Filter sorgen dafür, dass die UV-Bereiche von Spektren höherer Ordnung nicht gleichzeitig auf die Probe fallen, sondern absorbiert werden.

Der Probenstrom (Absorption) und das Signal des Pyrodetektors (Transmission) werden mit dem sogenannten Lock-In Verfahren verstärkt und von seinem Signalrauschen getrennt. Die beiden Signale haben dieselbe Frequenz, wie die vom 'Chopper' erzeugten Lichtpulse, da das interferierte Licht die Signale verursacht. Diese Kenntnis wird nun ausgenutzt. Die beiden Signale werden mit einem Referenzsignal von genau dieser Frequenz überlagert und es wird stets über einen gewissen Zeitraum (normalerweise: Periodendauer) integriert. Für zwei passende Frequenzen wird der Wert des Integrals maximal. Ein Hintergrundrauschen mittelt sich dagegen bei der Integration heraus.

2.5 Durchführung/Auswertung

Aufbau des Strahlengangs

Mit einem Blatt Papier lässt sich prüfen, ob das Licht der Lampe, nachdem es von einer ersten Linse gebündelt würde, auch wirklich parallel auf das optische Gitter fällt (Der Lichtkegel sollte auf dem ersten Arm der optische Bank einen konstanten Radius haben). Ebenfalls ist darauf zu achten, dass das interferierte Licht von einer zweiten Linse genau auf den Pyrodetektor fällt. Erst dann sollte die Halbleiterprobe davor angebracht werden. Vorsicht beim Einbringen des optischen Gitters: Dieses darf an der Vorderseite nicht mit den Fingern berührt werden.

Folgende Komponenten sind für die Messungen an den jeweiligen Proben ideal:

Probe	Filter	opt. Gitter	U-I-Wandler
Silizium	bläulicher Filter	1200 Linien/mm	ca. 0.75 mA
Germanium	silbriger Filter	600 Linien/mm	ca. 15 mA

Messungen Öffnen Sie auf dem Desktop des Messcomputers das Messprogramm 'LoggerPro'. Achtung: Für jede der beiden Proben gibt es eine unterschiedliche Voreinstellung im Messprogramm: Das Messprogramm berücksichtigt die jeweiligen Gitterkonstanten und kann die Energie $E(\phi)$ direkt aus dem Winkel ϕ des optischen Gitters berechnen.

Nachdem Sie die Verstärkung für Probenstrom und Pyrosignal so eingestellt haben, dass deren Messsignale (abgesehen von der hellen Mitte) 5 V nicht übersteigen, führen Sie für beide Proben folgende Messungen durch:

- Transmission und Absorption (gleichzeitig).
- Untergrund von Transmission und Absorption (gleichzeitig, abdecken der Probe).
- Messung ohne Probe: Strahlungsleistung der Lampe mit Filter.
- Wiederholtes Ablesen (5 s-Intervall) bei gleichem Winkel: Fehlerbalken.

Auswertung

Mit einem Auswertungsprogramm (Root, Origin) können Sie die Bandlückenenergie als Parameter aus der Funktionsanpassung eines das Absorbieren bzw. Transmittieren beschreibenden Zusammenhangs erhalten. Hierzu können Sie folgende Schritte durchführen:

1. Bereinigen der Spektren von ihrem Untergrund und normieren auf die Strahlungsleistung der Lampe

$$\text{Trans}_{\text{real}} = \frac{\text{Trans} - \text{Untergr}_{\text{Trans}}}{\text{Lampe}} \quad \text{Absorp}_{\text{real}} = \frac{\text{Absorp} - \text{Untergr}_{\text{real}}}{\text{Lampe}} \quad (2)$$

2. Die Transmission und die Absorption werden von folgenden Funktionen beschrieben:

$$\text{Trans: } T(E) = T_0 \exp(-\alpha(E) \cdot l) \quad \text{Absorp: } A(E) = A_0 (1 - \exp(-\alpha(E) \cdot l)) \quad (3)$$

T_0, A_0 : Konstanten,

$\alpha(E)$: Absorptionskoeffizient,

l : Dicke der Halbleiterprobe.

Im Falle der Absorption wird jedoch nie der gesamte Probenstrom gemessen. Die Elektron-Loch-Paare die von Photonen erzeugt wurden, die sehr nahe der Oberfläche absorbiert wurden, rekombinieren oft an Gitterdefekten, bevor sie registriert werden (Defekte im Kristallgitter sind Nahe der Oberfläche sehr häufig). Dieser Verlust an der Oberfläche wird durch eine 'Damage-Schicht' der Dicke d simuliert, durch welche die Photonen transmittieren müssen, bevor sie absorbiert werden können:

$$\text{Absorp: } A(E) = A_0 \exp(-\alpha(E) \cdot l) (1 - \exp(-\alpha(E) \cdot l)). \quad (4)$$

Der Absorptionskoeffizient ist gegeben durch:

$$\alpha(E) = AC \left(\frac{\tilde{\Theta}(E - E_g + E_p)^2}{\exp(E_p/kT) - 1} + \frac{\tilde{\Theta}(E - E_g - E_p)^2}{1 - \exp(-E_p/kT)} \right), \quad \text{mit } \tilde{\Theta}(x) = \begin{cases} x & x > 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

AC : Konstante,

E : Energie der eingestrahnten Photonen,

E_g : Bandlückenenergie,

E_p : Phononenenergie,

k : Boltzmannkonstante,

T : Temperatur.

Der durch (5) beschriebene Zusammenhang modelliert das Absorbieren eines Photons unter Vernichtung (erster Summand) und unter Erzeugung eines Phonons (zweiter Summand). Gewichtet wird jeweils mit der zu gegebener Temperatur mittleren Zahl vorhandener Phononen (erster Summand) und der vorhandener freier Phononzustände (zweiter Summand).

Wichtige Werte für die Anpassung der Transmissions- und Absorptionsfunktionen:

	Probendicke l [cm]	AC	Phononenenergie [eV]
Silizium	0,06	6199	0,061
Germanium	0,05	8823	0,036

Alternativ:

Es besteht die Möglichkeit die Bandlückenenergie aus der Überlagerung von Absorptions- und Transmissionsspektrum zu erhalten. Die Bandlücke, entsprechend der Energie, welche mindestens notwendig ist, um ein Elektron-Loch-Paar zu erzeugen, liegt hier bei genau der Energie, bei welcher beide Prozesse gleich wahrscheinlich sind.

Gehen Sie dabei wie folgt vor:

1. Analog zu Punkt 1 zuvor.
2. Führen Sie im Bereich beider Flanken der Spektren jeweils eine Geradenanpassung durch.
3. Schneiden Sie beide Funktionen mit der Horizontalen durch das Maximum des Transmissionsspektrums und derjenigen durch das Minimum des Absorptionsspektrums. Hieraus erhalten Sie eine obere und eine untere Grenze für die Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares.
4. Extrahieren Sie die Bandlückenenergie aus dem Mittelwert der beiden so erhaltenen oberen und unteren Grenzwerte.

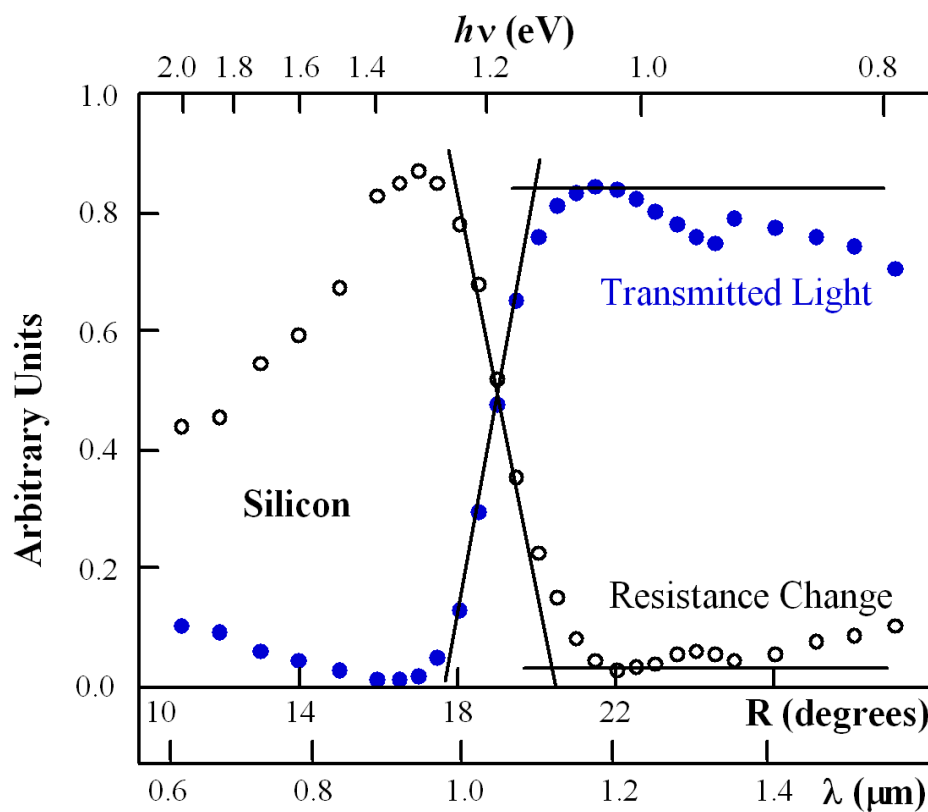


Abbildung 3: -without citation-

Grafik 3 zeigt beispielhaft die auf die Lichtintensität normierten Absorptions- und Transmissionskurven für einen Siliziumhalbleiter unter Anwendung des alternativen Prinzips der Bestimmung der Bandlückenenergie.

3 Das Haynes & Shockley-Experiment

3.1 Vorwort

J. R. HAYNES und W. SHOCKLEY gelang es 1949 zum ersten Mal die Bewegung von Ladungsträgern in Halbleitern direkt sichtbar zu machen. Sie erzeugten mit einem Spannungspuls in einer Germaniumprobe eine Ladungsträgerwolke und beobachteten die (von einer Treiberspannung verursachte) Bewegung dieser Wolke mit einem Oszilloskop.

Dieser Versuch vertieft und ergänzt die bei 1. Versuchsteil erlangte Kenntnis über Halbleiter. Hier entsteht ein Gefühl für die Größenordnung der mittleren Lebenszeit und der Beweglichkeit von Ladungsträgern in Halbleitern.

3.2 Vorkenntnisse

Informieren Sie sich über folgende Themen:

- Ladung im Elektrischen Feld (Bewegung, Diffusion, Kontinuitätsgleichung)
- Ladungsträger in Halbleitern
- Exponentieller Zerfall (Gleichung, mittlere Lebensdauer)
- Extrinsische Halbleiter

3.3 Aufgabenstellung

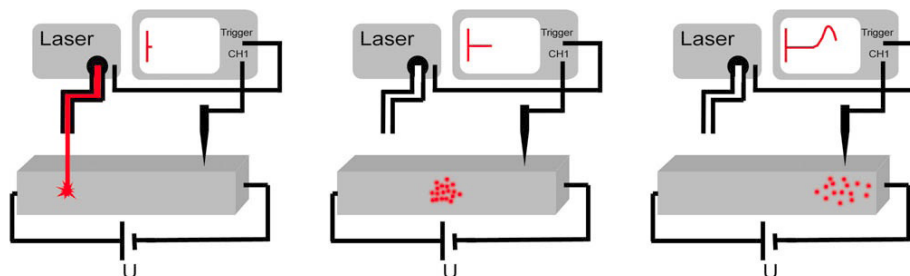
- Beobachten Sie die zeitliche und räumliche Entwicklung einer Ladungsträgerwolke, die von einem Laserpuls in einer Germaniumprobe erzeugt wurde.
- Vermessen Sie diese Entwicklung: Die Ladungsträgerwolke wird von einer Treiberspannung von dem Auftreffpunkt des Lasers zu der Prüfnadel des Oszilloskops bewegt. Variieren Sie in zwei Messreihen zum einen den Abstand Nadel-Laserpunkt und zum anderen den Wert der Treiberspannung.
- Berechnen Sie aus der zeitlichen Entwicklung des Schwerpunkts der Ladungsträgerwolke die Beweglichkeit μ freier Elektronen in p-Germanium.
- Berechnen Sie aus der zeitlichen Entwicklung der Signalstärke der Ladungsträgerwolke die mittlere Lebensdauer τ_e freier Elektronen in p-Germanium.
- Berechnen Sie aus der zeitlichen Entwicklung der Ladungsträgerwolke (Standardabweichung einer Gaußkurve) die Diffusionskonstante D_e für freie Elektronen in p-Germanium.

3.4 Versuchsbeschreibung



Die wesentlichen Elemente vom 2. Versuchsteil lassen sich einfach beschreiben: Ein Laserpuls wird von einem Lichtleiterkabel zur Oberfläche einer Germaniumprobe geführt. Da die Photonenenergie des Lasers größer ist als die Bandlückenenergie können die Photonen dort Elektronen in das Leitungsband heben. Durch einen Laserpuls entsteht so eine konzentrierte Ladungsträgerwolke (Elektronen, Löcher). An die Germaniumprobe ($40 \times 40 \times 300 \text{ mm}^3$, p-dotiert) wird eine Spannung (Treiberspannung) angelegt. Dies verursacht eine Bewegung der Ladungsträger. Mit einem Oszilloskop lässt sich diese Bewegung beobachten. Die Treiberspannung liegt jedoch nicht konstant an, da sich die Germaniumprobe ansonsten durch den konstanten Leckstrom während des Versuchs erwärmen würde. Der Ablauf 'Feld anlegen, Laserpuls, Signal messen' wiederholt sich mit einer Frequenz von ca. 30 Hz, nimmt jedoch nur ca. 2 % der Gesamtzeit in Anspruch; 98 % der Zeit kühlt die Probe ab. Damit auf dem Oszilloskop das Signal der Ladungsträger (klein) nicht zu stark von der Treiberspannung (groß) überlagert wird, lässt sich die Treiberspannung unter 'Shifted Output' intern wieder subtrahieren.

3.5 Durchführung/Auswertung



Aufbau/Verkabelung

Verbinden Sie das Triggersignal 'Trigger Out' für das Oszilloskop mit dem dafür vorgesehenen Anschluss 'EXT Trigger' und stellen Sie im Trigger Menu des Oszilloskops auf externen Trigger.

Schließen Sie an einen der Kanäle des Oszilloskops das, von der Treiberspannung subtrahierte Signal 'Shifted Output' an. An den zweiten Kanal sollte ein ebenfalls vorhandener Spannungstaster (kugelschreiberähnlich) angeschlossen werden. Dieser Spannungstaster wird später zur Messung der anliegenden Treiberspannung verwendet.

Vorbereitungen zur Messung

Machen Sie sich zunächst kurz mit der Benutzung der Schieblehre vertraut und stellen Sie dann einen Abstand von ca. 2 mm bis 3 mm zwischen dem Lichtleiterkabel des Laser und der Nadel ein. Sorgen Sie dafür, dass sich das Lichtleiterkabel sehr Nahe an der Oberfläche der Germaniumprobe befindet und dass die Nadel Kontakt mit der Germaniumprobe hat. Prüfen Sie ob die Polarität der anliegenden Spannung auf 'N' (negativ) gestellt ist.

Stellen Sie die Zeitaufösung des Oszilloskops auf $100\text{ }\mu\text{s}$ und versuchen Sie unter 'Level Shift' die anliegende Treiberspannung exakt zu annullieren (Dies muss während der Messungen oft nachgestellt werden).

Wenn Sie nun die Zeitaufösung des Oszilloskops auf ca. $1\text{ }\mu\text{s}$ und die Empfindlichkeit des Kanals auf ca. 50 mV vergrößern, so sehen Sie ein scharfes kurzes Signal (Laserpuls) und eine dahinter liegende Gaußglocke (vorbeifliegende Ladungsträger).

Das Invertieren des Kanals am Oszilloskop ermöglicht es, eine negative Ladungswolke als positiv wirkende Gaußglocke zu beobachten.

Sie können nun ein wenig an der Entfernung des Lichtleiterkabels (nicht Nadel) drehen und so die Veränderungen des Signals beobachten.

Messungen

Es sind zwei Messreihen aufzunehmen: Bei der ersten Messreihe wird die zeitliche Entwicklung des Signals durch Veränderung des Abstandes zwischen Lichtleiterkabel und Nadel beobachtet. Bei einer zweiten Messreihe bleibt dieser Abstand konstant, dafür wird die Treiberspannung variiert.

Vermessen Sie das Signal, indem Sie die zeitliche Lage gegenüber dem Laserpuls (Trigger) und den Ausschlag gegenüber dem Nullniveau mit dem Oszilloskop¹ aufnehmen. Variieren Sie dann Abstand beziehungsweise Treiberspannung und nehmen Sie erneut Messpunkte auf, usw..

Vermessen Sie die anliegende Treiberspannung, indem Sie mit dem Spannungstaster auf der vorderen der beiden Messingschienen die an die Probe angelegte Treiberspannung abgreifen (Zeitaufösung auf $100\text{ }\mu\text{s}$ zurückdrehen).

MESSREIHE 1: Vermessen Sie (mehrfach) das Signal bei einer Treiberspannung von ca. 50 V und einer Distanz, die von 2 mm bis etwa 10 mm variiert.

Bewegen Sie den Lichtleiter, nicht die Nadel.

MESSREIHE 2: Vermessen Sie (mehrfach) das Signal bei einer Distanz von etwa 4 mm und einer Treiberspannung, die von 15 V bis ca. 50 V variiert.

¹Die Daten sollen dabei direkt von dem Oszilloskop auf einen USB-Stick kopiert werden.

Auswertung

In einem p-dotierten Halbleiter ist das Verhalten der Ladungsträgerwolke durch die Differentialgleichung der Elektronen bestimmt. Diese Differentialgleichung wird von folgender Funktion gelöst:

$$c(t, x) = C \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{4\pi D_n t}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu_n E t)^2}{4D_n t}\right), \quad (6)$$

C : Konstante,
 τ_n : Lebenszeit der freien Elektronen,
 D_n : Diffusionskonstante der Elektronen,
 μ_n : Beweglichkeit der freien Elektronen,
 E : elektrische Feldstärke.

Die Funktion $c(t, x)$ beschreibt die Propagation der Ladungsträgerwolke im Halbleiter. Es werden hierbei mehrere Prozesse modelliert:

- Zum Zeitpunkt $t = 0$ s wird eine bestimmte Menge an Ladung freigesetzt, charakterisiert durch den Flächeninhalt der Verteilung C .
- Für $t > 0$ s breitet sich die Ladungsträgerwolke durch Diffusion im Festkörper aus, beschrieben durch eine Gaußkurve deren Breite σ mit $\sigma^2 = 4D_n t$ zunimmt.
- Gleichzeitig, bedingt durch den Konzentrationsüberschuss, rekombinieren die erzeugten Elektron-Loch-Paare wieder, wodurch die Menge an Ladung exponentiell mit einer gewissen Halbwertszeit abfällt nach $\exp(-t/\tau_n)$.
- Liegt ein konstanter Potentialgradient vor, bewegt sich die Menge der Ladungsträger mit ihrem Schwerpunkt mit der Geschwindigkeit $v = \mu_n E$.

An die aufgenommenen Signale soll eine Gauß-Funktion angepasst werden:

$$c(x) = A \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x - x_c)^2}{\sigma^2}\right), \quad (7)$$

A : Konstante,
 x_c : Schwerpunkt der Gaußglocke,
 σ : Standardabweichung.

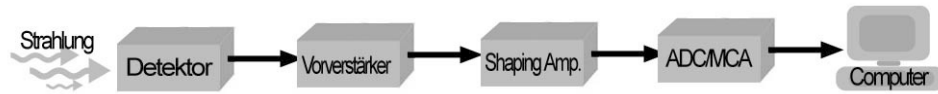
Aus dem Vergleich beider Funktionen lässt sich folgende zeitliche Entwicklung der Gaußfunktion ablesen:

$$x_c(t) = \mu_n E t, \quad A(t) = C \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right), \quad \sigma(t) = \sqrt{2D_n t} \quad (8)$$

Tragen Sie in Abhängigkeit der Zeit Schwerpunkt, Signalstärke und Standardabweichung der Signale in separate Diagramme und passen Sie diese drei Funktionen an. Sie erhalten als Fitparameter damit direkt Beweglichkeit, Lebensdauer und Diffusionskonstante für freie Elektronen in Germanium.

4 Halbleiterdetektoren

4.1 Vorwort



In diesem Versuch soll gezeigt werden, dass sich die Eigenschaften der Ladungsträger in Halbleitern eignen, um γ -Strahlung nachzuweisen und Spektrometrie zu betreiben. Die Spektren zweier radioaktiver Quellen sollen sowohl mit einer Silizium-Diode, als auch mit einem CdTe-Kristall aufgenommen werden. Dieser Versuch bietet einen Einstieg zum Verständnis der Halbleiterdetektoren. Der experimentelle Aufwand (v.a. bei der Auswertung) ist jedoch gering gehalten.

4.2 Vorkenntnisse

Informieren Sie sich über folgende Themen:

- Bändermodell (Bandlücke, Ladungsträger)
- Diode vs. Ohmscher Kontakt
- Photoeffekt und Comptoneffekt
- Vorverstärker, Shaping Amplifier, ADC/MCA
- Signalverbreiterung der Peaks (Gründe)

4.3 Aufgabenstellung

- Machen Sie sich mit dem Aufbau des Detektors und der dazugehörigen Elektronik vertraut.
- Vermessen Sie das Spektrum von ^{57}Co und ^{241}Am mit einer Silizium-Diode.
- Vermessen Sie das Spektrum von ^{57}Co und ^{241}Am mit einem CdTe-Kristall (Cadmiumtellurid und Gold: Ohmscher Kontakt)
- Berechnen Sie aus dem Verhältnis der Peakhöhen das Verhältnis der Absorptionswahrscheinlichkeiten von Silizium und CdTe.
- Berechnen Sie aus Lage und Breite der Peaks die relative Energieauflösung.

4.4 Versuchsbeschreibung

Zwei verschiedene Halbleiterdetektoren stehen zur Auswahl: Eine $n-n^+$ -Silizium-Diode und ein CdTe-Kristall. Der CdTe-Kristall liegt frei vor (es ist daher nötig ihn in einem lichtdichten Gehäuse unterzubringen). Die Diode hingegen ist von einer Epoxidschicht umschlossen. Beide Detektoren befinden sich zusammen mit ihren Vorverstärkern auf austauschbaren Platinen. In dem Detektorgehäuse befindet sich außerdem das Board für die Detektoren und Vorverstärker auf der einen, und das Board für den Shaping Amplifier auf der anderen Seite. Der Vielkanalanalysator MCA8000A und das Messprogramm ADMCA ermöglichen es, die Signale des Shaping Amplifiers gemäß ihrer Amplitude in Kanäle einzuordnen und so bei Auslesen der Kanäle ein Spektrum entstehen zu lassen.

Signalverlauf

Gibt ein hochenergetisches Photon bei einem Compton- oder Photoeffekt Energie an ein Elektron im Halbleiter ab, so regt dieses Elektron über Sekundärstöße eine Vielzahl an weiteren Elektronen vom gebundenen Zustand des Valenzbands in den quasi-freien Zustand des Leitungsbands an. Insgesamt ist die Anzahl an so entstandenen Ladungsträgern proportional zur ursprünglichen Energie des Photons. Legt man an den Halbleiter nun ein starkes elektrisches Feld an, so führt die zusätzliche Anzahl an Ladungsträgern, die von dem Photon erzeugt werden, zu einem kurzzeitigen Strom. Dieses Stromsignal wird von einem Vorverstärker in ein Spannungssignal umgewandelt, welches sich als scharfe Spannungsveränderung am Oszilloskop beobachten lässt. Von dem Vorverstärker aus wird dieses Signal an den Shaping Amplifier geleitet. Hier lädt das Spannungssignal einen Kondensator (C) auf, der sich wiederum über einen Widerstand (R) zu Masse entlädt (CR-Filter). Der Anstieg eines dadurch entstandenen Signals wird nun über einen Kondensator zu Masse und einen Widerstand (zwei RC-Filter) noch gedämpft. Insgesamt entsteht durch das sogenannte $CR-(RC)^2$ -Shaping aus einer 'Spannungskante' ein Spannungsspeak. Die Amplitude dieses Peaks ist proportional zur ursprünglichen Photonenenergie und kann deshalb vom MCA in Kanäle eingeordnet werden. Das Auslesen der Kanäle zeigt dann das Strahlungsspektrum der Quelle.

4.5 Durchführung/Auswertung

Aufnehmen der Spektren

Machen Sie sich mit dem Versuchsaufbau vertraut und identifizieren Sie die Komponenten des Detektors, wie sie im oben gezeigten Schaubild zu sehen sind. Wählen Sie einen der beiden Detektoren aus (Si oder CdTe) und stecken Sie dessen Platine auf das dafür vorgesehene Board. Nun sollten Sie den Deckel schließen und die ± 12 V-Versorgungsspannung für die Elektronik anlegen. Die Spannung die direkt an den Detektor angelegt wird, ist entscheidend für die Lage und Breite der Peaks im Spektrum. Legen Sie etwa 50 V an den Detektor an: Bei dieser Spannung ist die Signallage der Peaks ausreichend stark, deren Breite (Energieauflösung) jedoch nicht zu groß. Die dürfen die Spannung eines Detektors jedoch während des gesamten Versuchs nicht mehr verändern (s. Energieeichung). Starten Sie das Programm ADMCA und verbinden Sie sich mit dem MCA8000A ('connect'). Sie sind nun bereit ein Spektrum zu vermessen.

Vermessen Sie die Spektren von ^{57}Co und ^{241}Am mit der Silizium-Diode und dem CdTe-Kristall. Im Messprogramm ADMCA lässt sich unter 'Acquisition Setup' die Messdauer genau einstellen. Wenn Sie dies (für je ein Präparat) tun, ersparen Sie sich eine spätere Normierung auf die Messzeit. Um die Auswertung zusätzlich zu vereinfachen, kann auf eine Untergrundmessung verzichtet werden.

Auswertung

Passen Sie an den 59,5 keV-Peak von ^{241}Am sowie an den 122,06 keV-Peak und 136,47 keV-Peak von ^{57}Co eine Gaußkurve an:

$$c(x) = A \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x - x_c)^2}{\sigma^2}\right), \quad (9)$$

Benutzen Sie die drei bekannten Energien der Proben und die Lage der Peaks (x_c) im Spektrum, um eine Energieeichung durchzuführen. Durch eine sogenannte Eichgerade kann jedem Kanal seine Photonenenergie (eigentlich Photonenenergieintervall) zugeschrieben werden. Das Erstellen der Eichgeraden erfolgt für Silizium und CdTe separat.

Nun sollen die Absorptionswahrscheinlichkeiten ($\text{Abs}(E)$) von Silizium und CdTe verglichen werden. Die Absorptionswahrscheinlichkeiten werden von der Anzahl der registrierten Ereignisse (Gaußfit:A) in einer bestimmten Messzeit repräsentiert. Es muss jedoch noch berücksichtigt werden, dass die Detektoren eine unterschiedliche aktive Fläche a besitzen (Si: $a = 100 \text{ mm}^2$, CdTe: $a = 23 \text{ mm}^2$):

$$\frac{\text{Abs}_{\text{Si}}}{\text{Abs}_{\text{CdTe}}}(E) = \frac{A_{\text{Si}}/a_{\text{Si}}}{A_{\text{CdTe}}/a_{\text{CdTe}}}(E) \quad (10)$$

Berechnen Sie diese Absorptionsverhältnisse für die drei Photonenenergien 59,9 keV, 122,06 keV und 136,47 keV.

Zuletzt soll aus der Breite σ und der Lage x_c eines Strahlungspeaks die relative Energieauflösung des Detektors ($\text{RER}(E)$) berechnet werden. Üblicherweise wird dazu nicht direkt die Standardabweichung sondern die Halbwertsbreite (FWHM: Full Width at Half Maximum) eines Peaks verwendet. Die Halbwertsbreite lässt sich jedoch einfach aus der Standardabweichung einer Gaußkurve berechnen:

$$\text{RER}(E) = \frac{\text{FWHM}(E)}{E} = \frac{2\sqrt{2\ln 2}\sigma(E)}{E} \approx \frac{2,35\sigma(E)}{E}. \quad (11)$$

— (optional) —

Falls Sie bereits den Versuch 'Szintillationszähler' durchgeführt haben, vergleichen Sie die hier erhaltene Energieauflösung mit derjenigen der NaJ-Szintillatoren.

5 Geräteliste

6 Literaturwerte

Teil 1: Vermessung der Bandlücke:

Bandlückenenergie Silizium: $E_g = 1,12 \text{ eV}$

Bandlückenenergie Germanium: $E_g = 0,66 \text{ eV}$

Teil 2: Haynes & Shockley:

Beweglichkeit der Elektronen: $\mu_e = 3900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

Diffusionskonstante: $D_e = 101 \text{ cm}^2/\text{s}$

Mittlere Lebensdauer: $\tau_e = (45 \pm 2) \mu\text{s}$

Teil 3: Halbleiter-Detektor:

Absorptionsverhältnisse:

$\text{Abs}_{\text{Si}} / \text{Abs}_{\text{CdTe}} (59 \text{ keV}) = 1,40 \%$

$\text{Abs}_{\text{Si}} / \text{Abs}_{\text{CdTe}} (122 \text{ keV}) = 1,83 \%$

$\text{Abs}_{\text{Si}} / \text{Abs}_{\text{CdTe}} (136 \text{ keV}) = 2,00 \%$

7 Literatur

Literatur zum Versuch

- AMREIN, S.: *Halbleiter & Halbleiterdetektoren*, Staatsexamensarbeit, Universität Freiburg, 2008
- KITTEL, C.: *Einführung in die Festkörperphysik*, R. Oldenbourg, München, 12. Aufl., 2002
- LEO, W.R.: *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer Verlag, New York, 2nd Edition, 1994

Weiterführende Literatur

- SZE, S.M.: *Semiconductor Devices*, 2nd Edition, Wiley, 1981
- SCONZA, A.; GALET, G.; TORZO, G.: *An improved version of the Haynes-Shockley experiment with electrical or optical injection of the excess carriers*, American Journal of Physics, Volume 68, Issue 1, pp. 80-87 (2000)
- NIST: <http://physics.nist.gov>, Physical Measurement Laboratory