

Versuche P2-50

Elektrische Bauteile Versuchsvorbereitung

Thomas Keck und Marco A. Harrendorf, Gruppe: Mo-3
Karlsruhe Institut für Technologie, Bachelor Physik

Versuchstag: 18.04.2011

1 Elektrische Bauteile

In diesem Praktikumsversuch sollen die Eigenschaften von elektrischen Bauteilen untersucht werden. Grundsätzlich unterscheidet man Leiter (z.B. Kupfer), Halbleiter (z.B. dotierte Siliziumkristalle) und Nichtleiter (z.B. Glas). Die elektrische Leitfähigkeit von Stoffen kann theoretisch über das Bändermodell erfasst werden:

1.1 Bändermodell

In Festkörpern verschmieren die diskreten Energieniveaus der einzelnen Atome infolge der Wechselwirkung der Atome untereinander zu sogenannten Energiebändern. Zwischen diesen Energiebändern liegen Lücken, also Energiebereiche die Elektronen nicht besetzen können. Die einzelnen Energiebänder sind in der Lage Ladungen bzw. Energie zu transportieren wenn sie teilweise besetzt sind. In leeren Energiebändern sind keine Ladungsträger vorhanden, in voll besetzten keine Lücken für den Ladungstransport.

Das energetisch niedrigste Energieband das teilweise besetzt ist wird deshalb als Leitungsband bezeichnet, hier findet der Ladungs bzw. Energietransport statt. Direkt darunter befindet sich das vollbesetzte Valenzband. Es ist vollbesetzt, da wenn es teilbesetzt wäre, es das Leitungsband wäre. Das Valenzband besteht aus den Valenzelektronen der einzelnen Atome.

Die Fermienergie E_F gibt die Energie an, für die die Besetzungswahrscheinlichkeit von Elektronen gerade $\frac{1}{2}$ ist. Über das Bändermodell können nun die unterschiedlichen Eigenschaften von Festkörpern (Leiter, Halbleiter, Nichtleiter) erklärt werden.

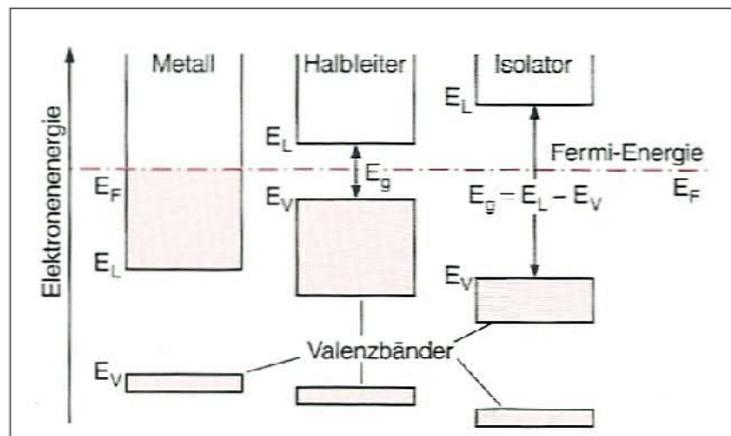


Abbildung 1: Das Bändermodell

In Leitern, also Metallen, sind bereits sehr niedrige Energieniveaus nur teilweise besetzt. Weiterhin überlappen sich die einzelnen Bänder zum Teil auch. Daher gibt es immer teilbesetzte

Energiebänder in denen der Ladungs und Energietransport stattfinden kann. Metalle sind deshalb hervorragende Leiter.

Bei Isolatoren ist das Leitungsband nicht besetzt und der Abstand zum Valenzband ist sehr groß, sodass eine hohe Aktivierungsenergie erforderlich ist, um ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband anzuheben. Isolatoren oder Nichtleiter, leiten deshalb erst bei sehr hohen Spannungen.

Im wichtigen Fall der Halbleiter liegen Leiterband und Valenzband dicht genug beieinander, dass Elektronen durch thermische Anregung ins Leiterband gelangen können und der Stoff leitend wird.

1.2 Dotierung

Halbleiter wie z.B. Silizium und Germanium besitzen eine geringe Leitfähigkeit, diese kann jedoch drastisch erhöht werden, indem Fremdatome in den Kristall eingefügt werden. Der Kristall der üblicherweise Gitterplätze mit 4 bindenden Elektronenpaaren besitzt, wird durch gezielte Verunreinigung durch 3 wertige (p-Dotierung) Fremdatome wie z.B. Bor und Indium oder durch 5 wertige (n-Dotierung) Fremdatome wie z.B. Arsen und Phosphor, leitend gemacht, da durch die Gittereffekte entweder positive Elektronenlücken oder negative Elektronen als Ladungsträger zur Verfügung stehen.

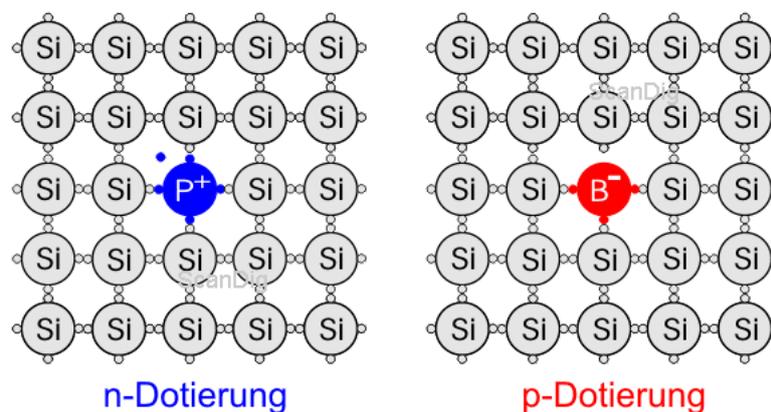


Abbildung 2: p und n Dotierung in Halbleitern

Bei einer n-Dotierung entsteht ein besetztes Energieband dicht unter dem Leitungsband, so dass die Elektronen hier sehr leicht durch thermische Anregung in das Leitungsband gelangen können, dies nennt man n-Leitung. Bei der p-Dotierung entsteht ein Band direkt über dem Valenzband, welches von den Valenzelektronen leicht besetzt werden kann, wodurch das Valenzband teilweise besetzt zurückbleibt und nun leiten kann, dies nennt man p-Leitung.

1.3 Diode

Verbindet man eine p und eine n dotierte Halbleiterschicht, so wandern die freien negativen Ladungsträger der n Schicht in die Lücken der p Schicht, bis die sich aufbauende Gegenspannung den Prozess stoppt. Zurück bleibt eine an Ladungsträgern verarmte Sperrschicht. Man nennt dieses Bauelement eine Diode.

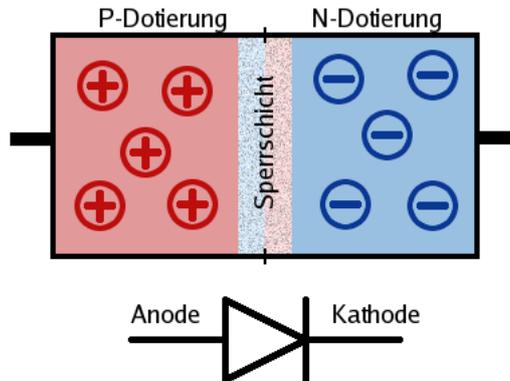


Abbildung 3: Diode - Schematisch und als Schaltsymbol

Legt man nun eine äußere Spannungsquelle mit dem positiven Pol an die n-Seite und negativen an der p-Seite (Polung in Sperrrichtung) an, so werden die restlichen Ladungsträger aus der Sperrschicht abgezogen bis die Diode vollständig sperrt. Es fließt keine Ladung mehr, da keine Ladungsträger in der verarmten Sperrschicht vorhanden sind. Den schwachen Sperrstrom aufgrund von thermischen Prozessen die doch wieder Ladungsträger erzeugen kann man meist vernachlässigen.

Im umgekehrten Fall, bei negativem Pol der äußeren Spannungsquelle an der n-Seite, und positiver Pol an der p-Seite (Polung in Durchlaßrichtung) werden die negativen Ladungsträger aus den Lücken der p-Schicht gezogen, neue Ladungsträger von der n-Schicht können nachrücken und ein stark spannungsabhängiger Durchlassstrom fließt durch die Diode.

Die Zener-Diode unterscheidet sich von der normalen Diode durch die sehr geringe Sperrschichtdichte. Ab einer bestimmten Spannung ist es Elektronen möglich vom Valenzband ohne Energieaufnahme in das Leitungsband zu tunneln, es fließt ein Strom in Sperrichtung, dies nennt man Zener-Effekt.

Oberhalb von 5.5V überwiegt jedoch der Lawinendurchbrucheffect, hierbei wird die Diode ebenfalls schlagartig sehr gut leitend. Beim Lawineneffekt haben Elektronen aufgrund der hohen Feldstärke genügend Energie um Valenzelektronen durch Stoßionisation in das Leitungsband anzuheben und sich danach selbst im Leitungsband weiter zu bewegen und weitere Ionisationen durchzuführen. Es kommt zu einer Art Lawine, in der immer mehr Elektronen ins Leitungsband angehoben werden. [Wikipedia]

2 Aufgabe 1: $R(T)$ - Abhängigkeit mithilfe der Wheatstonschen Brückenschaltung

Die Temperaturabhängigkeit $R(T)$ eines NTC-Widerstandes (Negativ Temperature Coefficient) oder auch Heißeleiters und eines PTC-Widerstandes (Positive Temperature Coefficient) auch Kaltleiter genannt, soll mithilfe der Wheatstonschen Brückenschaltung gemessen werden.

Mit der Wheatstonsche Brückenschaltung kann ein Widerstand R_m sehr genau bestimmt werden, falls der Widerstand von 2 anderen Bauteilen R_1, R_2 genau bekannt ist. Ein 4. Widerstand R_v muss variabel einstellbar sein. Im Versuch werden R_v und R_2 durch das Potentiometer festgelegt. Ein Spannungsmessgerät (oder Strommessgerät) wird in die Brücke eingebracht und ein Nullabgleich durchgeführt, der sehr genau geschehen kann, da der feinste Messbereich verwendet werden kann, in diesem Fall der μA Bereich des Multimeters. Liegt zwischen den Brückenenden gerade keine Spannung an, fließt also kein Strom, so haben die Widerstände das Verhältnis:

$$\begin{aligned} \frac{R_m}{R_1} &= \frac{R_v}{R_2} \\ R_m &= R_v \cdot \frac{R_1}{R_2} \end{aligned} \quad (1)$$

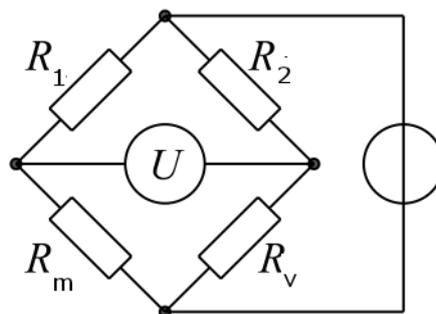


Abbildung 4: Wheatstonsche Brückenschaltung

Als Spannungsquelle dient im Versuch die PicoScope-Box mit $U = 2\text{V}$, um eine Erwärmung des Widerstandes durch den Messtrom zu verhindern, wird dieser jeweils nur kurz zur Messung eingeschaltet. Mithilfe eines Ofens wird der NTC-Widerstand von Zimmertemperatur auf 200°C erwärmt. Laut [Aufgabenstellung] ist eine Temperaturabhängigkeit der Form 2 zu erwarten.

$$R(T) = a \cdot e^{\frac{b}{T}} \quad (2)$$

Beim Abkühlen des Ofens von 200°C auf Zimmertemperatur wird der PTC-Widerstand vermessen. Laut [Aufgabenstellung] ist eine Temperaturabhängigkeit der Form 3 zu erwarten.

$$R(T) = R_0 + c \cdot T \quad (3)$$

Ein NTC kann zur Begrenzung des Einschaltstromes verwendet werden, da er anfangs schlecht, sobald er durch den Strom erwärmt wurde aber sehr gut leitet. Bei bekannter Temperaturabhängigkeit kann er natürlich auch als Thermometer dienen.

Der PTC kann ebenfalls zur Temperaturbestimmung eingesetzt werden.

3 Aufgabe 2: Kennlinien

In diesem Teilversuch sollen die Kennlinien verschiedener Bauteile aufgezeichnet werden. Unter anderem von der Zenerdiode: Diese Diode verhält sich in Durchlassrichtung wie eine Diode, in Sperrichtung wird sie jedoch ab einer bestimmten Durchbruchspannung U_B ebenfalls leitend. Es kommt zu einem sogenannten Lawinendurchbruch und zum Zener-Effekts, hierbei sinkt der Widerstand der Zener-Diode sehr schnell sehr stark. Die Diode geht dabei nicht kaputt. Daher kann die Zenerdiode zur Spannungsbegrenzung verwendet werden, indem sie in Sperrichtung parallel zum spannungsbegrenzten Bauteil geschaltet wird. Zur Stabilisierung wird noch ein Vorwiderstand R_V eingebracht, liegt die angelegte Spannung nun über der Durchbruchspannung der Zenerdiode, so fällt am parallelen geschalteten Bauteil die Durchbruchspannung der Zenerdiode ab, da sich der Widerstand der Zenerdiode bei höherer Spannung stark verringert und daher am Vorwiderstand ein größerer Spannungsabfall stattfindet.

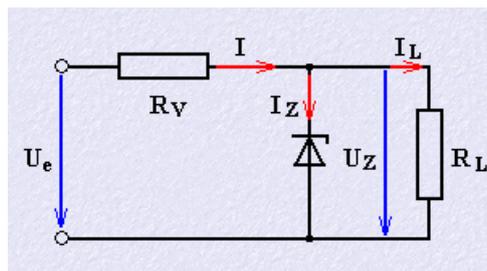


Abbildung 5: Stabilisierungsschaltung mit Zener-Diode

Ein anderes untersuchtes Bauteil ist der Varistor. Es handelt sich um einen spannungsabhängigen Widerstand, oberhalb einer bestimmten Schwellspannung U_S wird sein Widerstand sehr schnell kleiner. Der Varistor kann parallel zu einer Spule eingebaut werden. Hohe Induktionsspannungen führen dann, da der Widerstand bei diesen hohen Spannung sehr klein ist, zu einem Kurzschluss über der Spule der, durch die hohe Energieabsorption des Varistors aufgefangen wird. Bei normaler Spannung beeinflusst er die Schaltung nicht weiter, da der Widerstand hoch ist.

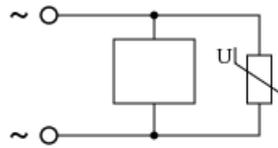


Abbildung 6: Schutzbeschaltung einer Spule mit Varistor

3.1 Aufgabe 2a: Messung der Kennlinien

Von den nachfolgenden Bauteilen:

1. Silizium-Diode
2. Germanium-Diode
3. Zener-Diode
4. Varistor
5. Photodiode
6. Photowiderstand
7. LED

soll mithilfe des USB-Oszilloskops bei einer Sinus-Eingangsspannung mit $f = 100\text{Hz}$ die (im Verhältnis zu einem passenden Widerstand) abfallende Spannung gemessen werden. In der X-Y-Darstellung kann dann die passende Kennlinie beobachtet werden.

3.2 Aufgabe 2b: Besonderheiten

Die Schwellenspannung der Silizium und Germanium Diode sollen ebenfalls bestimmt werden. Der Photowiderstand soll mit verschiedenen Beleuchtungen aufgenommen, und die Durchlassspannung von LEDs verschiedener Farbe gemessen werden. In alle Aufnahmen sollen die charakteristischen Punkte der Kennlinie eingezeichnet werden und die Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten der jeweiligen Bauteile daraus abgeleitet werden.

3.3 Aufgabe 2c: Frequenzabhängigkeit

Alle Bauteile werden nochmals mit verschiedenen Frequenzen der Eingangsspannung vermessen, es bietet sich hier an in 10er Potenzen von $f = 10\text{Hz}$, bis $f = 10\text{kHz}$ vorzugehen.

4 Aufgabe 3: Kennlinie des Phototransistors

In diesem Teilversuch soll die Kennlinie des Phototransistors beobachtet werden. Der Phototransistor lässt einen Strom vom Emitter zum Kollektor fließen, falls er mit Licht beleuchtet wird. Im Gegensatz zur Photodiode fließt dabei ein wesentlich höherer Strom als der durch das Licht, welches Elektronen in das Leitungsband anhebt, verursacht. Es handelt sich um einen Transistor dessen Basisstrom durch Licht induziert wird. Mit verschiedenen Beleuchtungsstärken soll die Kennlinie wie im vorherigen Versuch bestimmt werden, und der Zusammenhang zwischen Sperrstrom und Beleuchtungsstärke erfasst werden.

5 Aufgabe 4: Der Piezoelektrische Effekt

Wird auf ein Piezoelement ein mechanischer Druck ausgeübt, so kommt es infolge zu einer elektrischen Spannung die am Element abgegriffen werden kann. Der Piezoeffekt tritt in nichtleitenden Kristallen auf, die bei gerichteter Druckeinwirkung Dipole ausbilden, deren E-Felder sich zu einem makroskopischen E-Feld, und somit zu einer Spannung, aufsummieren.

Im Versuch soll die Druckänderung der Luft infolge eines Lautsprechersignals beobachtet werden, dabei sollte wieder das gleiche Signal aufgefangen werden, wie der Frequenzgenerator auf den Lautsprecher gegeben hat. Umgekehrt kann man durch anlegen einer elektrischen Spannung des Frequenzgenerators, das Piezoelement in Schwingung versetzen und so einen Lautsprecher erhalten.

Die Anwendungen von Piezoelementen sind extrem vielfältig: Z.B. als Tonabnehmer in akustischen Gitarren, als Lautsprecher bis in den Ultraschallbereich und als Mikrophone.

6 Aufgabe 5: Hochtemperatursupraleiter

In diesem Teilversuch wird die Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters bestimmt. Ein Supraleiter verliert unter einer gewissen Temperatur seinen Widerstand vollständig. D.h. die Elektronen können sich (als sogenannte Cooper-Paare) stoßfrei durch das Leitungsband bewegen.

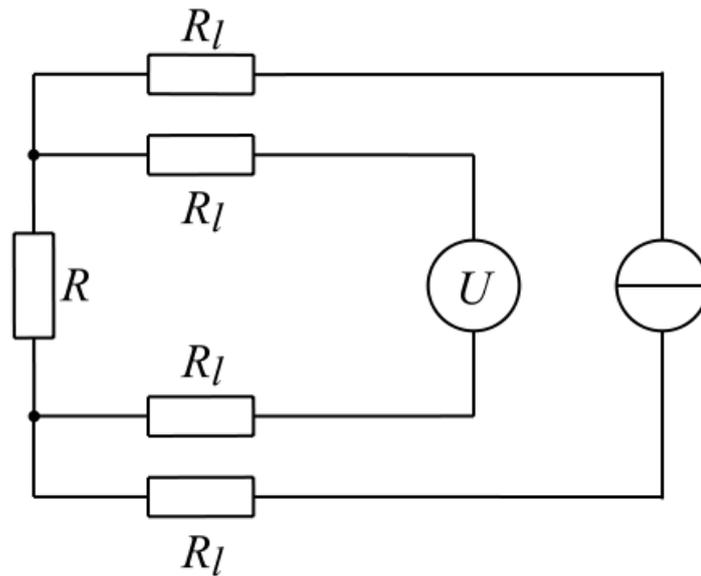


Abbildung 7: Vierleiterschaltung

Es wird eine sogenannte Vierleiterschaltung verwendet, der Strom I (maximal 0.2A) und die Spannung U sollen während des Versuches konstant gehalten werden. Die Temperatur wird dabei über den Temperaturgradienten oberhalb des Stickstoffbades bestimmt. In 5 Kelvin Schritten wird der Supraleiter bis auf eine Temperatur von 100 Kelvin abgekühlt. Dabei wird die Spannung U und der Strom I gemessen, worüber später der Widerstand R berechnet werden kann.

Bei der Vierleiterschaltung wird das Spannungsmessgerät über 2 eigene Leitungen direkt an den Widerstand R angeschlossen, die Widerstände R_l der Zu und Ableitung werden so nicht mitgemessen, dies ist bei der Supraleitung wichtig, da der Widerstand des Hochtemperatursupraleiters im supraleitenden Zustand unterhalb des Widerstandes R_l der Leitungen liegt. Die zusätzlichen Widerstände der Leitungen an und vom Spannungsmessgerät fallen jedoch nicht ins Gewicht, da diese im Vergleich zum Spannungsmessgerät einen sehr kleinen Widerstand besitzen.

Literatur

[Aufgabenstellung] Aufgabenstellung zu den Versuchen P2-50

[Vorbereitungshilfe] Vorbereitungshilfe zu den Versuchen P2-50

[Wikipedia] <http://de.wikipedia.org/wiki/Zener-Effekt>

Abbildungsverzeichnis

1	Vorbereitungshilfe	2
2	http://www.filmscanner.info/Bilder/CCD_01.gif	3
3	http://entladung.net/ep004/pn_diode.png	4
4	http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/e/e3/WhBr_Diagonalbild.svg	5
5	http://www.elektroniktutor.de/analog/uz_stabi.html	6
6	http://de.wikipedia.org/wiki/Schutzbeschaltung	7
7	http://de.wikipedia.org/wiki/Vierleitermessung	9