

Vorbereitung: Elektrische Bauelemente

Christine Dörflinger und Frederik Mayer, Gruppe Do-9

27. Juni 2012

Inhaltsverzeichnis

0	Allgemeines	3
0.1	Bändermodell	3
0.2	Dotierung	3
0.3	Diode	3
0.4	Zener-Dioden	4
0.5	Photodiode	4
0.6	Photowiderstand	4
0.7	Phototransistor	4
0.8	Leuchtdiode (LED: Light Emitting Diode)	5
1	Untersuchung der Temperaturabhängigkeit verschiedener Bauteile mithilfe der Wheatstoneschen Brückenschaltung	5
2	Aufnahme von Kennlinien	6
3	Verhalten eines Phototransistors bei verschiedenen Beleuchtungsstärken	6
4	Druckabhängige Bauelemente	6
4.1	Piezoelektrischer Effekt	6
4.2	Aufgabenstellung	7
5	Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters	7
5.1	Supraleiter Grundlagen	7
5.2	Vierleiterschaltung	7
5.3	Aufgabenstellung	7
6	Quellen	7

0 Allgemeines

0.1 Bändermodell

Liegt ein einziges Atom vor, so besetzen dessen Elektronen scharfe Energieniveaus. In Festkörpern, in denen die Atome in einem Gitter angeordnet sind, wechselwirken Atome jedoch und es entstehen Energieniveaus, die nahe beieinander liegen und als Energiebänder bezeichnet werden. Zwischen den Energiebändern liegen Energielücken, also Bereiche, in denen Elektronen kein Energieniveau besetzen können.

Elektronen, die weiter vom Atomkern entfernt sind, unterliegen einem schwächeren Einfluss des Kerns und erfahren mehr Wechselwirkungen. Weiter entfernte Energiebänder sind in der Folge breiter, nahe am Kern liegende sind schmaler.

Damit ein Energieband Strom leiten kann, darf es weder voll besetzt noch ganz leer sein. Das innerste Band im Atom heißt Valenzband und ist voll besetzt. Daher trägt es nicht zum Ladungstransport bei. Das darüber liegende Band heißt Leitungsband, da es teilweise besetzt ist und damit zum Ladungstransport beitragen kann. Darüber liegende Bänder sind wenig besetzt.

Mit dem Bändermodell sollen im Folgenden die Leitungseigenschaften von Metallen, Halbleitern und Isolatoren erklärt werden.

- (a) **Metalle:** Bei Metallen wird nicht zwischen Valenz- und Leitungsband unterschieden. Bereits bei tiefen Temperaturen ist das Leitungsband teilweise mit Elektronen besetzt. Die Leitfähigkeit von Metallen ist daher gut, mit zunehmender Temperatur nimmt sie allerdings ab.
- (b) **Isolatoren:** Bei Isolatoren ist der Abstand ΔE zwischen Valenz- und Leitungsband sehr groß und das Leitungsband ist nicht besetzt. Da Elektronen kaum in das Leitungsband angehoben werden können, ist die elektrische Leitfähigkeit sehr schlecht.
- (c) **Halbleiter:** Die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern liegt zwischen der von Metallen und Isolatoren. Bei tiefen Temperaturen ist das Valenzband voll besetzt und das Leitungsband leer. Die elektrische Leitfähigkeit ist daher bei tiefen Temperaturen sehr schlecht. Durch thermische Anregung können jedoch Elektronen in das Leitungsband angehoben werden, was einerseits zum Transport von Löchern im Valenzband (**Eigenleitung**) und andererseits zu Elektronentransport im Leitungsband führt. Daher steigt die Leitfähigkeit mit der Temperatur an.

0.2 Dotierung

Die Leitfähigkeit von Halbleitern kann auch durch das gezielte Einbringen von Verunreinigungen gesteigert werden. Dies soll anhand von Silizium (4-wertig) erklärt werden.

Im reinen Zustand sind alle Außenelektronen kovalent gebunden, es sind also keine freien Ladungsträger vorhanden und die elektrische Leitfähigkeit ist damit sehr gering. Dotiert man aber mit 3- oder 5-wertigen Atomen (zum Beispiel Aluminium oder Phosphor), so entstehen Elektronenlücken ('Defektelektronen') oder ungebundene Elektronen, die die elektrische Leitfähigkeit stark erhöhen. Halbleiter mit einem Elektronenüberschuss nennt man (negativ) n-dotiert, sind hingegen viele Elektronenlücken vorhanden, nennt man den Halbleiter (positiv) p-dotiert.

0.3 Diode

Halbleiterdioden aus zwei aneinandergrenzenden Schichten von einem p-dotierten und einem n-dotierten Halbleiter aufgebaut.

Liegt keine elektrische Spannung an der Diode an, so stellt sich ein Gleichgewicht ein (p-n-Übergang): Die Elektronenlücken aus dem p-Kristall wandern in den n-Kristall, und die ungebundenen Elektronen aus dem n-Kristall wandern in den p-Kristall. Dies geschieht so lange, bis das sich aufbauende Elektrische Feld den Diffusionsprozess stoppt. Nun hat sich eine Sperrschicht (in der sich keine freien Ladungsträger befinden) zwischen dem p- und dem n-Halbleiter gebildet. Legt man an die Diode eine Spannung an, verhält sie sich je nach Polung unterschiedlich:

Legt man den Pluspol an den n-Halbleiter und den Minuspol an den p-dotierten Halbleiter, so wird das Elektrische Feld an der Sperrschicht verstärkt und Elektronen und Elektronenlöcher werden von der Sperrschicht weggezogen. Dann fließt lediglich ein sehr kleiner Sperrstrom, der lediglich durch thermische Erzeugung freier Ladungsträger zustande kommt. Erhöht man die Spannung jedoch immer weiter, so kommt es bei einer bestimmten Durchbruchsspannung doch zu einem Stromfluss. Dies nennt man auch Lawineneffekt.

Polzt man die Diode hingegen anders herum, so wird das Elektrische Feld der Sperrschicht hingegen abgebaut und die Diode wird ab einer bestimmten Spannung, der Diodenschwellspannung, stark leitfähig.

Die Kennlinie einer Halbleiterdiode folgt im Durchlassbereich der Gesetzmäßigkeit

$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{n \cdot U_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

Wobei I_S den Sperrstrom und n und U_T eine Konstanten bezeichnet.
Die Kennlinie einer Diode sieht folgendermaßen aus:

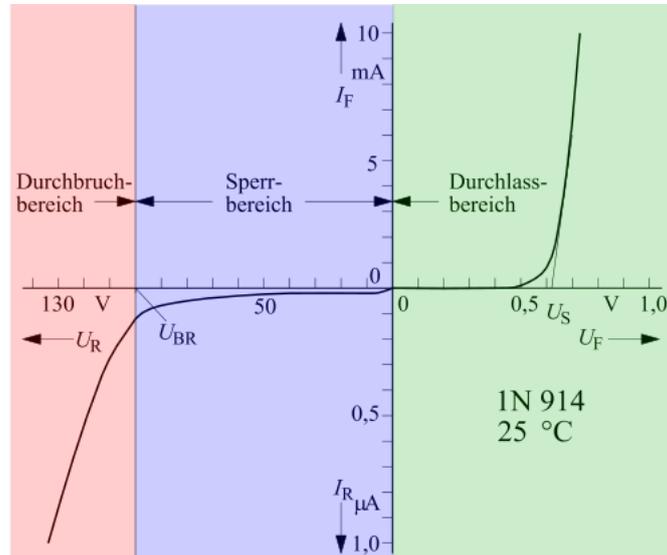


Abbildung 1: Kennlinie einer Diode mit 3 Bereichen: Sperrbereich, Durchlassbereich und Durchlassen in Sperrrichtung: Lawineneffekt

0.4 Zener-Dioden

Zener-Dioden sind Dioden, die für den Betrieb in Sperrichtung ausgelegt sind und eine definierte Durchbruchspannung U_{Z0} besitzen, ab der die Diode niederohmig wird.

Sie bestehen aus stark dotierten Halbleitern mit schmalen p-n-Übergang. Beim Betrieb in Sperrichtung tritt der Zener-Effekt auf: Ab einer bestimmten elektrischen Feldstärke werden Elektronen aus den Kristallbindungen gelöst und durch das Elektrische Feld beschleunigt. Diese Elektronen können weitere Elektronen aus ihren Bindungen schlagen, was zu einer Art Lawineneffekt führt. Die Diode wird niederohmig und leitet den Strom.

Zenerdioden können beispielsweise zur Spannungsstabilisierung oder zur Spannungsbegrenzung verwendet werden.

0.5 Photodiode

Bei Photodioden handelt es sich um Silizium-Germanium-Halbleiterdioden. Der Lichteinfall erfolgt an deren pn-Übergang: Bei Belichtung werden Photonen absorbiert, sodass in der Umgebung der Raumladungszone Elektronen-Loch-Paare entstehen. Diese machen bewegen sich als Driftstrom durch die Raumladungszone. Außerhalb der Raumladungszone werden Elektronen-Loch-Paare gebildet, die sich als Diffusionsstrom zur Raumladungszone hin bewegen. Diese beiden Effekte werden zum intensitätsabhängigen Photostrom I_P zusammengefasst.

0.6 Photowiderstand

Bei Photowiderständen ändert sich der Widerstand mit der Intensität der Beleuchtung (innerer Photoeffekt). Wenn Photonen auf Kristallbindungen 'treffen' werden diese zerstört, sodass Elektronen freigesetzt werden. Die so entstandenen freien Elektronen erhöhen die Leitfähigkeit; der Widerstand wird geringer.

0.7 Phototransistor

Phototransistoren sind Siliziumtransistoren, bei denen die Basis-Kollektor-Sperrschicht beleuchtet werden kann. Die Steuerung erfolgt hierbei nicht über einen Basisanschluss, sondern über den spannungserzeugenden Lichteinfall. Die Transistorstufe sorgt durch die Verstärkung für eine höhere Lichtempfindlichkeit als andere optoelektrische Bauteile.

0.8 Leuchtdiode (LED: Light Emitting Diode)

Leuchtdioden sind Dioden die bei Betrieb in Durchlassrichtung Licht emittieren. Sie bestehen aus einem n-leitenden Grundhalbleiter und einer p-leitenden Halbleiterschicht mit großer Löcherdichte, wodurch die Elektronen rekombinieren: Fällt ein Elektron aus dem Leitungsband ins Valenzband wird die Energiedifferenz ΔE als Lichtimpuls mit Wellenlänge $\lambda = \frac{c}{f}$ emittiert. Diese Wellenlänge und damit die Farbe ist abhängig vom Halbleitermaterial, bzw. vom Abstand zwischen Leitungs- und Valenzband. Die Lichtstärke verhält sich bei LEDs proportional zur Stromstärke. Da sie empfindlich auf große Ströme reagieren, wird ein strombegrenzender Vorwiderstand in Reihe verwendet.

1 Untersuchung der Temperaturabhängigkeit verschiedener Bauteile mithilfe der Wheatstoneschen Brückenschaltung

In diesem Versuch soll mithilfe der Wheatstone'schen Brückenschaltung die Temperaturabhängigkeit verschiedener Bauteile untersucht werden.

Die Wheatstone'sche Brückenschaltung ist folgendermaßen aufgebaut:

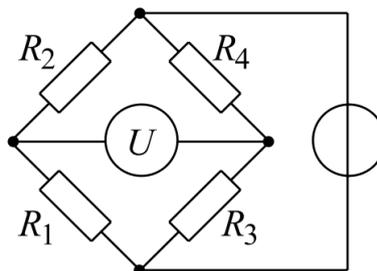


Abbildung 2: Wheatstone'sche Brückenschaltung

Einer der Widerstände ist ein Potentiometer, und ein anderer Widerstand ist ein Bauteil, das untersucht werden soll. Das Potentiometer wird so eingestellt, dass am Spannungsmessgerät keine Spannung abfällt. Dann gilt für die Stromstärken:

$$I_{links} = \frac{R_2}{U_{oben}} = \frac{R_1}{U_{unten}} \quad (2)$$

$$I_{rechts} = \frac{R_4}{U_{oben}} = \frac{R_3}{U_{unten}} \quad (3)$$

$$\Rightarrow \frac{U_{unten}}{U_{oben}} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (4)$$

Mithilfe der letzten Gleichung kann also ein unbekannter Widerstand über 3 bekannte Widerstände berechnet werden. Der Vorteil hierbei ist, dass Widerstände auf diese Weise recht genau bestimmt werden können.

Zunächst soll ein NTC-Widerstand (heißleitend) untersucht werden. Man erwartet eine $R(T) = a \cdot e^{b/T}$ -Gesetzmäßigkeit. Die Koeffizienten können durch logarithmische Auftragung und lineare Regression bestimmt werden.

Anschließend soll ein kaltleitender Widerstand (PT100) vermessen werden. Dieser Widerstand sollte der Gesetzmäßigkeit $R(T) = R_0 + c \cdot T$ folgen. Hier sollen erneut die Koeffizienten bestimmt werden.

2 Aufnahme von Kennlinien

Eine Spannungsstabilisierung mithilfe einer Zener-Diode lässt sich folgendermaßen realisieren:

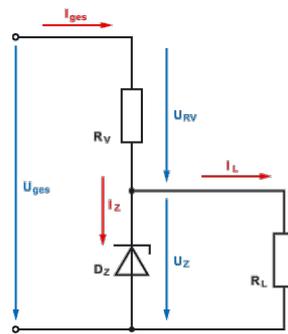


Abbildung 3: Spannungsstabilisierung mittels Zener-Diode

Zenerdioden werden in Sperrichtung ab einer bestimmten Durchbruchsspannung leitfähig. Da die Leitfähigkeit der Zenerdiode über dieser Spannung sehr stark zunimmt, wird diese Durchbruchsspannung in der oben abgebildeten Schaltung ungefähr gehalten.

Ein Varistor hat ebenso einen spannungsabhängigen Widerstand, der mit zunehmender angelegter Spannung absinkt und ab einem Schwellenwert einbricht. Im Gegensatz zur Zener-Diode hat er keine Vorzugsrichtung. Schaltet man einen Varistor parallel zu Induktivitäten, so fließen hohe Spannungen oder Spannungsspitzen über den Varistor ab. Parallel geschaltete Bauteile werden so geschützt. Treten nur niedrige Spannungen auf, hat der Varistor nur einen geringen Einfluss auf die Schaltung.

Im Folgenden sollen Kennlinien (Strom über Spannung aufgetragen) verschiedener Bauteile am USB-Oszilloskop aufgenommen werden. Das Oszilloskop soll im XY-Betrieb laufen. Die Stromstärke erhält man, indem man die Spannung an einem in Reihe geschalteten Referenzwiderstand misst.

Es sollen folgende Bauteile untersucht werden: Silizium-Diode, Germanium-Diode, Zener-Diode, Varistor, Photodiode, Photowiderstand (mit steigender Lichtintensität abnehmender Widerstand) und LED.

Zuletzt soll noch die Frequenzabhängigkeit der Bauelemente untersucht werden.

3 Verhalten eines Phototransistors bei verschiedenen Beleuchtungsstärken

Mit der Schaltung aus der vorherigen Aufgabe sollen Kennlinien eines Phototransistors bei verschiedenen Beleuchtungsstärken dargestellt werden. Aus den Kennlinien wird nun jeweils der Sperrstrom entnommen und in einem Diagramm in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke dargestellt.

4 Druckabhängige Bauelemente

4.1 Piezoelektrischer Effekt

Bei bestimmten Kristallen (Piezoelemente) führt eine Druckänderung zur Ladungsträgertrennung.

a) Direkter piezoelektrischer Effekt:

Als direkter piezoelektrischer Effekt bezeichnet man das Auftreten von Spannungen bei Verformung (gerichtete Kraft wird ausgeübt) eines Festkörpers. Durch die Verformung verschieben sich die Ladungsträger; Dipole bilden sich aus, wodurch ein Elektrisches Feld entsteht.

b) Indirekter piezoelektrischer Effekt

Im Gegensatz zum direkten piezoelektrischen Effekt wird hier ein Festkörper durch Anlegen einer Spannung verformt. Durch das so angelegte E-Feld wird im Inneren des Körpers eine Polarisation induziert. Aus der Polarisation resultiert die Verformung.

Durch Anlegen einer sinusförmigen Wechselspannung können Piezoelemente in Schwingung versetzt werden. Aus dem Verhältnis von mechanischer Energie zu elektrischer Energie ergibt sich der materialspezifische piezoelektrische Koeffizient.

Anwendungen: Piezofeuzeuge, Piezolausprecher, mechanische Sensoren

4.2 Aufgabenstellung

Der oben beschriebene Piezoelektrische Effekt wird nun am Oszilloskop beobachtet. Zunächst werden verschiedene Drücke auf ein Piezo-Plättchen ausgeübt. Außerdem macht man ein Frequenzsignal sichtbar, in dem per Frequenzgenerator Signale auf den Lautsprecher gegeben und auf das Piezoelement übertragen werden.

5 Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters

5.1 Supraleiter Grundlagen

Bei Supraleitern fällt der Widerstand unterhalb einer Sprungtemperatur T_C (materialspezifisch) auf einen unmessbar kleinen Wert ab. Bei vergleichbar hohen Sprungtemperaturen spricht man von Hochtemperatursupraleitern.

Der Widerstand in einem Leiter entsteht durch Wechselwirkungen zwischen Elektronen und Fehlerstellen des Kristallgitters und Gitterschwingungen. Der Effekt der Supraleitung beruht auf den sogenannten Cooper-Paaren, welche sich durch Polarisationswechselwirkungen mit dem Gitter im Leiter ausbilden. Durch die Kopplung der Elektronen zu Paaren kann keine Energie an das Gitter abgegeben werden. Der Widerstand wird verschwindend gering. Die Elektronen des Paares sind Fermionen (Spin 1/2), daher können sie sich nicht im gleichen Zustand aufhalten (Pauliprinzip). Aufgrund dessen gilt für den Gesamtspin $s=0$.

5.2 Vierleiterschaltung

Die Vierleitermessung wird in diesem Versuch verwendet, da ein sehr geringer Widerstand gemessen werden soll. Da der Widerstand beim Supraleiter so gering ist, würden bei 'normaler' Messung die Leitungs- und Anschlusswiderstände die Ergebnisse verfälschen.

5.3 Aufgabenstellung

Die Probe wird zunächst auf 77K abgekühlt (Temperaturgradient über Stickstoff-Bad). Anschließend wird eine Messreihe aus U_g bei der jeweiligen Temperatur T in 5K-Schritten aufgenommen.

In der Auswertung wird der Widerstand $R = \frac{U_g}{I}$ über die Temperatur T aufgetragen und die Sprungtemperatur angegeben.

6 Quellen

- Wheatstone'sche Brückenschaltung:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e3/WhBr_Diagonalbild.svg/500px-WhBr_Diagonalbild.svg.png

- Spannungsstabilisierung mit Zener-Diode:

<http://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/schalt/10121511.gif>

- Kennlinie einer Diode:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/db/Kennlinie_Diode_1N914.svg/500px-Kennlinie_Diode_1N914.svg.png