

Physik-Praktikum: TRA1

1. Versuch: Ausgangskennlinie

Ziel

Messung der Ausgangskennlinie $I_C = f(U_{CE})_{I_B}$ für $I_B = 0,1 \text{ mA}$, $0,3 \text{ mA}$, $0,5 \text{ mA}$.

Aufbau (bei allen vier Versuchen)

Siehe Schaltbild. Strom- und Spannungsmessungen werden mit Keithley 129 Digitalmultimetern vorgenommen.

Durchführung

Mit fest eingestelltem Basisstrom wird die Emitter-Kollektor-Spannung in Schritten von $0,1 \text{ V}$ erhöht und jeweils der Kollektorstrom gemessen.

Ermitteln Sie den Stromverstärkungsfaktor $B = I_C / I_B$ aus drei Ausgangskennlinien für $U_{CE} = 3 \text{ V}$ (Mittelwert).

Der Strom wird $(188 \pm 1,9)$ -fach verstärkt (Mittelwert).

Fehlerquellen (bei allen 3 Kennlinienmessungen)

- Einschwingzeit der Schaltung
- Anzeige der Digitalmultimeter schwankt

2. Versuch: Eingangskennlinie

Ziel

Messung der Eingangskennlinie $I_B = f(U_{BE})_{U_{CE}}$ des Transistors für $U_{CE} = 0 \text{ V}$, 3 V .

Durchführung

Bei fester Emitter-Kollektor-Spannung wird die Emitter-Basis-Spannung in $0,05 \text{ V}$ -Schritten erhöht und jeweils der Basisstrom gemessen.

Tragen Sie die Eingangskennlinie ($U_{CE} = 0 \text{ V}$) im halb-logarithmischen Maßstab auf. Aus der Steigung des Graphen ist die Betriebstemperatur des Transistor sowie die Größenordnung des Sperrstroms zu ermitteln.

Siehe Blatt.

Temperatur: Basis-Emitter-Strecke als Diode;

$$I_B = I_0 \cdot e^{\frac{e U}{k_B T}}$$

Fehlerquellen

Siehe Ausgangskennlinie.

3. Versuch: Steuerkennlinie

Ziel

Messung der Steuerkennlinie $I_C = f(U_{BE})_{U_{CE}}$ des Transistors für $U_{CE} = 3 \text{ V}$.

Durchführung

Bei fester Emitter-Kollektor-Spannung wird die Emitter-Basis-Spannung in 0,05 V-Schritten erhöht und jeweils der Kollektorstrom gemessen.

Fehlerquellen

Siehe Ausgangskennlinie.

4. Versuch: Diodenkennlinie der Basis-Emitter-Strecke

Ziel

Messung der Diodenkennlinie (wenn möglich; auf jeden Fall Durchbruchspannung) der Basis-Emitter-Strecke.

Aufbau

An die Spannungsquelle wird der Transistor mit Emitter und Basis so angeschlossen, dass die Emitter-Basis-Diode in Sperrrichtung betrieben wird (beim vorliegenden pnp-Transistor also die Basis an den Pluspol und den Emitter an den Minuspol); in den Stromkreis (hier: an den Pluspol der Spannungsquelle) wird ein 10 k Ω -Widerstand zur Strombegrenzung angeschlossen. An die Basis wird direkt ein Amperemeter (Digitalmultimeter, s.o.) zur Messung des Stroms und zwischen Amperemeter und Widerstand auf der einen und dem Emitter auf der anderen Seite ein Voltmeter zur Spannungsmessung angeschlossen, die Messung ist also stromrichtig.

Durchführung

Die Basis-Emitter-Spannung wird in 0,05 V-Schritten erhöht und der Sperrstrom der Diode gemessen, bis die Diode durchschaltet. Diese Durchbruchspannung wird möglichst genau bestimmt; Ergebnis: $(7,18 \pm 0,02)$ V. Auf höhere Spannungen wird verzichtet, weil sich dabei der Strom nicht ändert, die Diode ist praktisch widerstandslos (im Vergleich zu den anderen Widerständen im Stromkreis), der Strom wird nur noch vom 10 k Ω -Widerstand bestimmt.

Fehlerquellen

- Empfindlichkeit der Messgeräte: es konnte kein Sperrstrom gemessen werden.
- Deshalb lässt sich die Durchbruchspannung nur grob bestimmen, weil der Bereich, in dem das Amperemeter einen Strom kleiner als der Strom nach dem Durchbruch anzeigt, sehr klein ist, das Amperemeter schwankt stark, die Spannung ist schwer einzustellen.
- Nach dem Diodendurchbruch blieb der Strom konstant, weil dann der Widerstand im Stromkreis den Strom bestimmte (für Messung bräuchte man Diode und einen Stromkreis, die sehr hohe Ströme aushalten (Kühlung?) und eine Spannungs-/Stromquelle, die diesen hohen Strom liefern kann).

5. Warum wurden von den in Abb. 10 (a), (b) und (c) gezeigten Schaltungen jeweils die rechten Schaltungen verwendet?

Gemessen wurde nur mit den drei Digitalmultimetern (und Strom bzw. Spannung so geregelt, dass diese den richtigen Wert anzeigen); also sind nur deren Innenwiderstände relevant, die Innenwiderstände der Einbauminstrumente des 0-15 V-Netzgeräts spielen daher keine Rolle.

Die bei den drei Abbildungen jeweils rechten Messschaltungen sind spannungsrichtige Schaltungen, bezogen auf den Transistor (im Gegensatz zu den linken, die stromrichtig messen).

Eingestellt wurden jeweils Spannungen in der Größenordnung 1 V, die gemessenen Ströme waren in der Größenordnung 1 mA (bei der Eingangskennlinie sogar noch darunter); das ergibt für den Transistor einen Widerstandswert zwischen Kollektor und Emitter im Bereich von

$R = \frac{U}{I} = \frac{V}{\text{mA}} = m \Omega$. Der Innenwiderstand der Multimeter beträgt bei der Spannungsmessung $10 \text{ M}\Omega$, was sehr groß im Vergleich dazu ist und bei einer Parallelschaltung den Strom kaum verändert. Bei der Strommessung beträgt der Innenwiderstand je nach Messbereich zwischen $0,01 \Omega$ und 100Ω , was sogar etwas größer als der Transistorwiderstand ist, und so bei einer Reihenschaltung die Spannung extrem stark verfälschen würde. Also muss man auf jeden Fall die spannungsrichtigen Schaltungen verwenden, weil der dann auftretende Fehler bei der Strommessung viel akzeptabler ist als der Fehler bei der Spannungsmessung bei Stromrichtiger Schaltung.

Die spannungsrichtige Messung ist sogar so genau, dass der Fehler bei der Strommessung maximal $I = \frac{U_{max}}{R} = \frac{3 \text{ V}}{10 \text{ M}\Omega} = 0,3 \mu \text{ A}$ ist, was kleiner als die Ablesegenauigkeit der Messgeräte ist; daher ist eine Fehlerrechnung eigentlich überflüssig.

6. Fragen

Was versteht man unter einem Halbleiter?

Ein Halbleiter leitet den Strom entweder durch Elektronen oder Defektelektronen (Löcher), während ein Metall den Strom mit seinen vielen schwach gebundenen Valenzelektronen leitet, die wegen ihrer schwachen Bindung als „Elektronengas“ bezeichnet werden und quasi frei beweglich zwischen den Atomrümpfen sind, was der Grund für die gute Leitfähigkeit ist (die Elektronen sind von Anfang an z.T. im Leitungsband). Halbleiter sind Heißleiter, bei steigender Temperatur sinkt der Widerstand ($\rho \approx 10^{-3} \dots 10^{-9} \Omega/\text{cm}$), weil die stärker als bei Metall gebundenen Elektronen durch die Wärmeenergie aus ihren Bindungen befreit werden und in das Leitungsband gehoben werden (bei $T = 0 \text{ K}$ leiten sie überhaupt nicht, das Leitungsband ist leer), während bei einem Metall bei höherer Temperatur ein anderer Effekt greift: die höhere kinetische Energie bewirkt mehr Stöße mit den Elektronen und behindert diese, Metalle sind also Kaltleiter.

Was besagt das Bändermodell?

Bei Atomen gibt es diskrete Energiebereiche, die „Bänder“ genannt werden, nämlich (neben den Energieniveaus der Elektronen, die fest in den inneren Schalen des Atoms gebunden sind) das Valenzband (in dem sich die gebundenen Valenzelektronen der äußersten Schale befinden) und das Leitungsband (dort befinden sich die nicht gebundenen Elektronen, die Strom leiten können). Dazwischen ist eine Lücke mit „verbotenen“ Energieniveaus. In einem voll besetzten Band findet kein Ladungstransport statt, da keine freien Ladungsträger vorhanden sind.

Diese Bänder entstehen dadurch, dass die an sich scharf abgegrenzten Energieniveaus der Elektronen sich durch gegenseitige Beeinflussung vieler Elektronen im Festkörper überlagern und so breite, in sich kontinuierliche Bänder entstehen.

Bei Metallen ist das Leitungsband schon bei $T = 0 \text{ K}$ teilweise besetzt \rightarrow gute Leitfähigkeit schon bei tiefen Temperaturen. Bei reinen Halbleitern müssen die Elektronen erst mit Hilfe thermischer Energie aus dem Valenzband in das Leitungsband „angehoben“ werden, damit Strom fließen kann.

Was versteht man unter Eigen- und Störstellenleitung?

Durch thermische Energie werden Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben; die dadurch entstehende „Lücke“ im Valenzband kann von einem anderen Valenzelektron aufgefüllt werden, worauf wieder eine Lücke entsteht. Je nach Betrachtungsweise wandern also Elektronen von Loch zu Loch, oder es wandert das Loch von Elektron zu Elektron. Dies nennt man Eigenleitung.

Wird das Gitter durch fünfwertige Atome (Donatoren; z.B. Phosphor, Arsen) verunreinigt (dotiert), so ist ein Valenzelektron nicht durch Bindungen abgesättigt. Die Energieniveaus dieser Atome liegen in der „verbotenen Zone“, jedoch ist der Abstand zum untersten Niveau des Leitungsbandes nur von der

Größenordnung 0,01 eV. Das zusätzliche Valenzelektron kann also leicht abgelöst und ins Leitungsband gehoben werden. In diesem Fall sind die freien Ladungsträger negativ geladene Teilchen (n-Leitung). Bei Substitution eines Si-Atoms durch ein dreiwertiges Fremdatom (Bor, Indium) fehlt ein Valenzelektron, das leicht aus einer benachbarten Bindung ergänzt werden kann. Dabei entsteht ein negativ geladenes Ion und ein positiv geladenes „Loch“. Weil diese Fremdatome Elektronen aufnehmen, nennt man sie Akzeptoren. Da der Ladungstransport durch positiv geladene Löcher erfolgt, spricht man von p-Leitung. Diesen Vorgang nennt man Störstellenleitung.

Welche Eigenschaften hat ein pn-Übergang?

Während im Inneren des p- und des n-Bereichs Ladungsgleichgewicht herrscht, diffundieren an der Grenzschicht überschüssige Elektronen aus dem n-Bereich in den p-Bereich (um die Löcher aufzufüllen). Der Bereich, in den die Ladungsträger hineindiffundieren, heißt Sperrschicht. Dadurch wird ein elektrisches Feld zwischen n- und p-Bereich erzeugt, was der Diffusion entgegengesetzt ist, so dass ein Gleichgewicht entsteht und die Diffusion stoppt. Wenn man dieses Gleichgewicht stört, indem man durch Anlegen einer Spannung zusätzliche Elektronen in den n-Bereich schafft und die in den p-Bereich diffundierten Elektronen absaugt, kann der Diffusionsstrom frei fließen, die Diode schaltet durch. Wird die Spannung umgekehrt angelegt, so wird das Gegenfeld verstärkt und die Diffusion noch stärker behindert, das ist dann die Sperrrichtung der Diode; nur der sehr kleine Sperrstrom (wegen der immer vorhandenen Minoritätsladungsträger) kann fließen. Bei zu starker Sperrspannung werden Elektronen durch die Spannung so stark beschleunigt, damit genug Energie vorhanden ist, dass neue Valenzelektronen in das Leitungsband gehoben werden, die wiederum andere Elektronen durch Stöße ins Leitungsband heben können; dieser Lawineneffekt bewirkt den Durchbruch der Diode, Strom kann plötzlich gut fließen.

Was ist ein bipolarer Transistor? Wie ist seine Funktionsweise?

Ein bipolarer Transistor ist ein Transistor, bei dem sowohl negative als auch positive Ladungsträger am Stromtransport beteiligt sind (im Gegensatz zu den unipolaren FETs). Er besteht im Prinzip aus zwei Dioden, die einen dotierten Bereich gemeinsam haben; je nachdem, welcher das ist, spricht man von npn- oder pnp-Transistoren.

Bei einem npn-Transistor fließt bei der Emitterschaltung der (geringe) Steuerstrom von der Basis zum Emitter, was möglich ist, weil das in Durchlassrichtung der Basis-Emitter-Diode ist (die Basis ist positiv gegenüber dem Emitter gepolt). Die Kollektor-Basis-Diode ist dagegen in Sperrrichtung. Dadurch gelangen viele freie Elektronen vom Emitter her in die Basis (sie machen ja den Stromfluss aus), während sie in der Basis „abgesaugt“ werden (es entsteht also ein Konzentrationsgefälle der Elektronen in der Basis vom Emitter zum Kollektor); können die Elektronen vom Emitter bis zum Kollektor hindurchdiffundieren, werden sie dort abgesaugt, ein Strom kann fließen. Ist dagegen die Basis negativ gegenüber dem Emitter gepolt, ist die Emitter-Basis-Diode ebenfalls in Sperrrichtung, kein Strom kann fließen.

Welche Grundschaltung des Transistors gibt es? Welche Eigenschaften haben sie?

Der Name der Schaltung sagt aus, welcher Anschluss des Transistors am gemeinsamen Potenzial von Steuer- und Schaltkreis liegt.

Emitterschaltung:

Der Kollektorstrom wird über den Basisstrom gesteuert; daher ist die Stromverstärkung sehr groß $B = I_C / I_B$. Je nach Lastwiderstand erhält man auch eine Spannungsverstärkung, also eine große Leistungsverstärkung.

Basisschaltung:

Die Stromverstärkung ist ungefähr 1, da der Kollektorstrom ungefähr gleich dem Emitterstrom ist. Es ergibt sich eine große Spannungsverstärkung, weil die Kollektor-Basis-Spannung groß gegen die Emitter-Basis-Spannung ist.

Kollektorschaltung:

Die Kollektorschaltung ist ähnlich wie die Emitterschaltung; die Ausgangsspannung wird am Emitter (statt am Kollektor) abgegriffen. Die Stromverstärkung ist ähnlich wie bei der Emitterschaltung, aber die Spannungsverstärkung ist ca. 1.

Welcher Wellenlänge entspricht die Energielücke in Si und Ge, wenn in einer lichtemittierenden Diode die Lichtemission durch Band-Band-Übergänge erfolgt? Welche Energielücke muss der Halbleiter haben?

$$E_{\text{Si}} = \frac{\hbar c}{\lambda_{\text{Si}}} = 1,12 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_{\text{Si}} = \frac{\hbar c}{E_{\text{Si}}} = 1,11 \mu \text{ m} .$$

$$E_{\text{Ge}} = \frac{\hbar c}{\lambda_{\text{Ge}}} = 0,67 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_{\text{Ge}} = \frac{\hbar c}{E_{\text{Ge}}} = 1,85 \mu \text{ m} .$$

Das ist weit im Infrarotbereich. Um sichtbares Licht zu erhalten ($800 \text{ nm} \geq \lambda \geq 200 \text{ nm}$), muss die Energielücke als deutlich größer, etwa $1,5 \text{ eV} \leq E_g \leq 6 \text{ eV}$, sein.