Plancksches Wirkungsquantum und Boltzmann-Konstante

1 Vorbereitung

1.1 Austrittsarbeit, Photoeffekt und Photozelle
Lit.: GERTHSEN

1.2 Interferenzfilter, Vakuumdiode (Elektronenröhre)
Lit.: GERTHSEN

1.3 Grundlagen der Halbleiterphysik
Lit.: Anhang zu Versuch 27

1.4 p-n-Gleichrichter
Lit.: KITTEL

1.5 Boltzmann-Verteilung
Lit.: GERTHSEN

1.6 Shockleysche Gleichung
Lit.: Anhang

1.7 Gerätebeschreibung
Thermostat LAUDA RE 104
Digital-Multimeter Keithley 179 TRMS
Multimeter Metrix VX 203 A

2 Aufgaben

2.1 Messung des Planckschen Wirkungsquantums

Aus der Einsteinschen Gleichung (s. GERTHSEN)

$$E = \varepsilon U = h\nu - A \tag{1}$$

lässt sich das Plancksche Wirkungsquantum h auch ohne Kenntnis der Austrittsarbeit A bestimmen, wenn man die Bremsspannungen U als Funktion von ν aufträgt: die Steigung der resultierenden Gerade ist h/ε (ε = Elementarladung). Zur Erzeugung monochromatischer Strahlung verwenden wir Interferenzfilter:

Die Leuchtzone einer Quecksilberhochdrucklampe beleuchtet einen variablen Spalt (wird meist weggelassen). Dieser wird mit der Linse 1 auf die Photozelle abgebildet. Die Interferenzfilter transmittieren das Licht nur bei bestimmten Wellenlängen. Um Störstrahlung zu vermeiden sollten sie direkt vor der Photozelle aufgebaut werden. Dringend zu beachten ist, dass beim Wechsel des Interferenzfilters kein Licht auf die Photozelle fällt. Reiter mit Alublech in den Strahlengang stellen.

Die Lampe wird durch Einschalten des Netzgerätes gezündet. Die Lampe darf nicht abgeschaltet werden, bevor sie mindestens 20 Minuten gebrannt hat!

Die eigentliche Messanordnung zeigt Abb. 1. Die Kathode der Vakuumphotozelle besteht aus Natrium ($A \approx 2$ eV), die Anode aus einem dünnen Platinring ($A \approx 5$ eV). Vor der Photozelle ist eine Blende (schwarzes Rohr) angebracht, damit die Anode nicht direkt von Photonen getroffen werden kann.

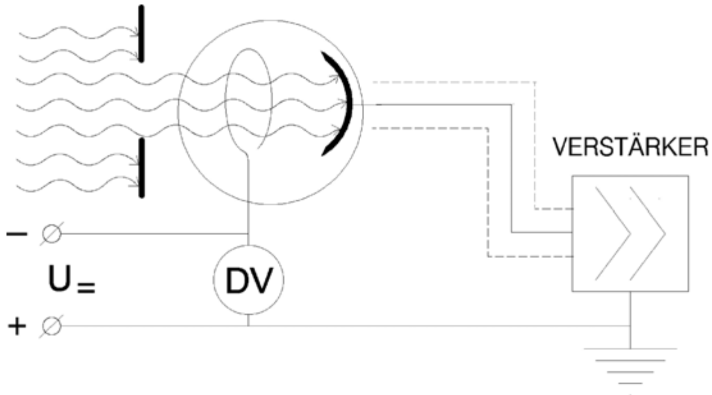

Abb. 1

Zwischen Anode und Kathode liegt eine regelbare Spannung, mit der man die aus der Kathode tretenden Elektronen abbremsen kann. Die Spannung wird mit einem Digitalvoltmeter gemessen. Die Kathode ist mit dem Eingang eines sehr empfindlichen Pikoamperemeter verbunden.

Die beiden Kabel mit den Bananensteckern (mit Tesaband zusammengeklebt) führen nur zur Anode. Sie sind lediglich dazu da, die Anode gegebenenfalls auszuheizen. Dies muss sehr vorsichtig und darf nur durch den Betreuer durchgeführt werden. **Die Bremsspannung wird nur zwischen die Anode (zusammengesteckte schwarze Kabel) und die Kathode (Loch unter der Photozelle am Gehäusehalter (Stift)) angelegt.**
Der Kathodenstrom zeigt in Abhängigkeit von der Gegenspannung eine Charakteristik wie in Abb.2 skizziert.

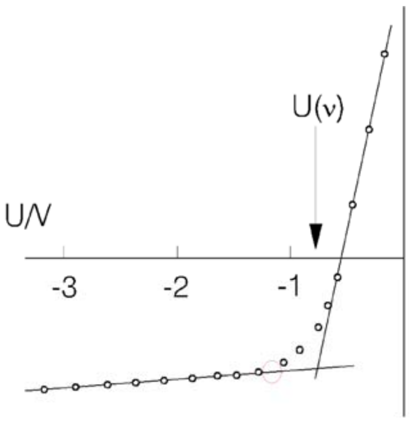

Abb. 2
Bestimmung der Bremsspannung nach dem Asymptotenverfahren

Der Strom bei hoher Gegenspannung kommt daher, dass die Anode von gestreuter Strahlung getroffen wird, die dort Elektronen auslöst. Bei den hier verwendeten Photonenenergien dürften wegen der großen Ablösearbeit des Platins keine Photoelektronen ausgelöst werden. Da die Anodenoberfläche Verunreinigungen enthält, kommt es trotzdem zum Photoeffekt. Die Bestimmung der Bremsspannung wird dadurch deutlich erschwert.

Ein ausführlicher Hinweis zur Problematik der möglichen Auswerteverfahren liegt am Arbeitsplatz aus. Üblicherweise wird in Grundpraktika das Tangenten- (oder Asymptoten-) Verfahren angewendet. Dieses ist jedoch sehr ungenau und führt je nach Lage der steilen Tangente zu fehlerhaften Bremsspannungen U(ν). Es ist wesentlich besser, die Spannung als Bremsspannung zu verwenden, bei der der Strom vom nahezu waagrechten Verlauf abknickt (roter Kreis in Abb. 2). Es werden insgesamt fünf Messreihen für die Wellenlängen 577 nm, 546 nm, 436 nm, 406 nm und 365 nm durchgeführt. Wenn eine Messreihe mit einer neuen Wellenlänge begonnen wird, informiere man sich zunächst ungefähr über die Größe des Stroms bei -3V. Anschließend ermittle man ungefähr die Spannung, bei der dieser Strom etwa zweimal kleiner geworden ist (**betragsmäßig**). Für die detaillierte Messung wähle man, bei etwa –3 V beginnend, geeignete Spannungsschritte, wobei selbstverständlich in der Nähe des Knicks in kleineren Spannungsschritten gemessen werden sollte. Die ermittelten Bremsspannungen werden gegen v graphisch aufgetragen; durch die Punkte ist eine mittlere Gerade zu legen. Daraus berechne man h/ε und schließlich h. Hier ist darauf zu achten, dass die Werte, die mit großen Frequenzen bestimmt wurden stärker gewichtet werden (Warum? – Tipp: die Austrittsarbeit ist etwa 2 eV).

2.2 Messung der Bolzmannkonstante

Zur Messung der Spannungsabhängigkeit des Diffusionsstromes nach Gl. 5 ist ein einfacher p-n-Übergang (Diode) nicht geeignet, da hierbei – neben dem Eigenleitungsstrom I – noch eine Reihe von Störströmen auftreten (z.B. Leckströme an den Kristalloberflächen). Man benutzt daher als *Bremsstrecke* für den Diffusionsstrom die Basis-Emitter-Sperrschicht eines Transistors (npn-Leistungstransistor 2N 3055) und misst den Diffusionsstrom, der die dünne Basiszone überwiegend (95 bis 99,5 Prozent) ungestört passiert, aber erst an der Kollektor-Elektrode (s. Abb. 3). Da zwischen Kollektor und Basis kaum Spannung anliegt, treten dort auch keine merklichen Störströme auf, und man misst den ungestörten Diffusionsstrom nach Gl. 5.

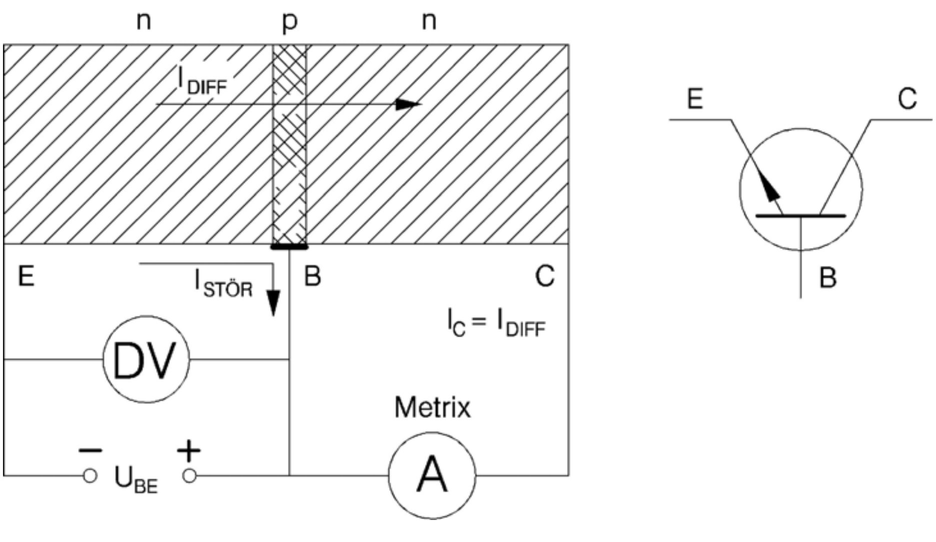

Abb. 3

Der Transistor ist in ein Thermostatgefäß eingebaut. Man messe für 3 verschiedene Temperaturen (ca. 20 K, 60 K und 100 K über Zimmertemperatur) die Kennlinie $I_C(U_{BE})$ beginnend bei $U_{BE} = 0$ V in geeigneten Schritten bis zu I_C-Werten von etwa 10 mA. Zur Strommessung verwende man das Metrix-Instrument (1 µA-Bereich ausnutzen!), zur Spannungsmessung das Digitalvoltmeter (1 V-Bereich). Die Auswertung erfolgt entsprechend dem Anhang. Man gebe den Mittelwert aus den 3 Messreihen an.

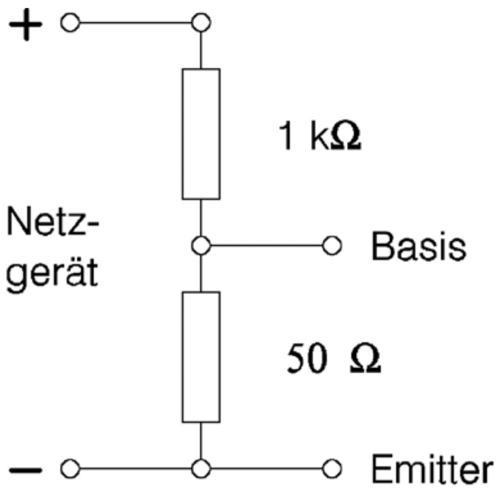

Abb. 4

Um die Basis-Emitterspannung besser einstellen zu können, wird die Spannung an einem Spannungsteiler abgegriffen.

2.3 Fehlerrechnung

Für das Plancksche Wirkungsquantum und die Boltzmann-Konstante ist eine Fehlerbetrachtung anzustellen.

3 Anhang

Shockleysche Gleichung

Auch ohne Anlegen einer äußeren Spannung bildet sich an einem p-n-Übergang bekanntlich (Versuch 27) eine Potentialdifferenz aus, die sog. Antidiffusionsspannung U_A. Obwohl in diesem Fall kein äußerer Strom fließt, finden in der Sperrschicht Ladungsträgerbewegungen statt:

a) Durch thermische Anregung werden Ladungsträger ins Leitungsband gehoben, die dem Potentialgefälle folgen und einen Eigenleitungsstrom I_0 verursachen.

b) Aus dem p- und n-Gebiet in die Sperrschicht hineindiffundierte Ladungsträger besitzen zum Teil eine hinreichende Energie $E > \varepsilon \cdot U_A$ (ε = Elementarladung), um gegen die Potentialdifferenz U_A anzulaufen;
sie verursachen einen Diffusionsstrom $I_D(U_A)$. Die Häufigkeitsverteilung $N(E)$ der Teilchenenergien entspricht der Boltzmann-Statistik

$$N(E)\mathrm{d}E = \mathrm{const} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E}{kT}} \mathrm{d}E \qquad (2)$$

Da der Diffusionsstrom $I_D(U_A)$ von den Teilchen mit $E > \varepsilon \cdot U_A$ herrührt, gilt

$$I_D(U_A) = \mathrm{const} \cdot \varepsilon \int_{\varepsilon U_A}^{\infty} N(E)\mathrm{d}E = \mathrm{const}\ \varepsilon\ k\,T \cdot \mathrm{e}^{-\frac{\varepsilon \cdot U_A}{kT}} \qquad (3)$$

An einem sich selbst überlassenen p-n-Übergang stellt sich gerade eine solche Potentialdifferenz U_A ein, dass der Diffusionsstrom den Eigenleitungsstrom I_0 aufhebt:

$$I_\mathrm{D}(U_\mathrm{A}) = |I_0| \tag{4}$$

Wird an den p-n-Übergang in Durchlassrichtung eine Spannung U gelegt, so braucht der Diffusionsstrom nur noch gegen das Potential $\varepsilon \cdot (U_\mathrm{A} - U)$ anzulaufen; analog zu Gl. 3 erhält man

$$I_\mathrm{D}(U) = \mathrm{const}\ \varepsilon\ k\,T \cdot \mathrm{e}^{-\frac{\varepsilon \cdot (U_\mathrm{A} - U)}{kT}} = \mathrm{e}^{\frac{\varepsilon \cdot U}{kT}} \cdot I_\mathrm{D}(U_\mathrm{A}) = \mathrm{e}^{\frac{\varepsilon \cdot U}{kT}} \cdot |I_0| \tag{5}$$

Bei bekannter Temperatur kann man nach Gl. 5 aus einer halblogarithmischen Auftragung von I_D gegen U (Steigung: $\Delta(\ln I) / \Delta U = \varepsilon / kT$) bei Kenntnis der Elementarladung die Boltzmann-Konstante bestimmen. Dem Diffusionsstrom I_D fließt der Eigenleitungsstrom I_0 entgegen; für den Gesamtstrom gilt daher die *Shockleysche Gleichung*

$$I(U) = |I_0| \cdot \left(\mathrm{e}^{\frac{\varepsilon \cdot U}{kT}} - 1 \right) \tag{6}$$