

Leitfähigkeit und Hall-Effekt

Betreuer: Julia Dobbert (Zi. 3'610 Tel. 2093-7990)

Raum: 3'202

1. Thema

Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes und der Hall-Konstanten eines Quecksilber-Cadmium-Tellurid-Einkristalls

2. Versuchsdauer

1 Tag

3. Literatur:

1. Bergmann-Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 6. Verlag Walter de Gruyter, Berlin, New York 1992. Kapitel 6: Halbleiter (Auszüge: S. 473 – 495, S. 595 – 598)
2. H. Ibach, H. Lüth: Festkörperphysik, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, HongKong 1990. Kapitel 12: Halbleiter (Auszug: S. 279 – 299)
3. V.L. Bonc-Bruевич, S. G. Kalasnikov: Halbleiterphysik, Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin 1982. Kapitel 1: Einige Eigenschaften von Halbleitern, S.15-48
4. W. Brauer, H.-W. Streitwolf: Theoretische Grundlagen der Halbleiterphysik, 2. Auflage, Akademie-Verlag Berlin 1977. Kapitel 14: Elektrische Leitfähigkeit (Auszug: S. 177 – 181)
5. W. Hoerstel, A. Klimakow, R. Kramer, Journal of Crystal Growth **101** (1990), S. 854-858: Influence of deep level intrinsic defects on the carrier transport in p-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$
6. W. M. Higgins, G. N. Pultz, R. G. Roy, R. A. Lancaster, J. L. Schmit, J. Vacuum Science and Technology **A7** (1989), 271-275: Standard relationships in the properties of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

4. Zielstellung

Beschreibung der Leitfähigkeit von Halbleitern. Untersuchung der elektrischen Eigenschaften des Halbleiters $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ im Gebiet der Störstellenleitung und der Eigenleitung durch Messung der Temperaturabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ und der Hall-Konstanten R_H im Temperaturbereich von 55 K bis 300 K. Bestimmung von Halbleiter-Kenngrößen: Breite der verbotenen Zone E_g , Ladungsträgerkonzentration (n, p), Beweglichkeit der Majoritätsladungsträger, Verhältnis der Beweglichkeiten von Elektronen und Löchern, Aussagen zum Leitungstyp. Aneignung der Grundlagen der experimentellen Messtechnik für die Untersuchung der elektrischen Transporteigenschaften von Halbleitern (Digitalmesstechnik).

5. Experimentelle Hinweise

Der Versuch wird zunächst für Messungen bei Raumtemperatur eingerichtet. Die Funktion des Aufbaus den Positionen 5.1 - 5.7 gemäß ist durch Kontrollmessungen zu überprüfen.

5.1 Magnetstromversorgung

Schalten Sie vor allen anderen Geräten die Magnetstromversorgung ein. Die Magnetstromversorgung kann über die Bedienungselemente an der Frontplatte oder aber ferngesteuert betrieben werden. Der Stromsollwert kann nicht ferngesteuert werden. Eine dem Strom proportionale Spannung U_M liegt an den mit dem elektronischen Schaltgerät verbundenen Buchsen an.

5.2 Kalibrierung des Elektromagneten

Das Magnetfeld des Elektromagneten ist in Abhängigkeit vom Erregerstrom I_M in Stufen von etwa 1 A mit einer kalibrierten Hall-Sonde (GaAs-Kristall) auszumessen.

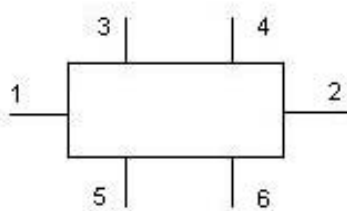
Hinweis: Vor der Messung ist die Hall-Sonde im Magnetfeld optimal zu platzieren. Der Elektromagnet wird mit Wasser gekühlt. Ein Durchfluß von etwa 2 l/min ist ausreichend. Abstellen des Kühlwassers nach Versuchsende nicht vergessen!

5.3 Temperaturmessung

Die Temperatur am Probenort wird mit einer geeichten Si-Diode gemessen und am Temperaturregelgerät in Kelvin angezeigt. Dem Regelgerät kann eine der Temperatur proportionale Spannung U_T entnommen werden (100 K entsprechen 1 V).

5.4 Aufbau des Messkreises für die Messung des elektrischen Widerstandes und der Hall-Konstanten

Die Leitfähigkeits- und Hall-Effekt-Messung erfolgt nach der Gleichstrommethode. Der Kristall ist mit 6 Kontakten versehen (bei einigen Messproben fehlt einer der Kontakte 3...6).



Kontaktbelegung:

1, 2 ... Stromanschlüsse;

3, 4 bzw. 5, 6 ... Messung von U_ρ ;

4, 6 bzw. 3, 5 ... Messung von U_H

Die Messprobe wird von Ihnen in den Probenträger des Kryostaten eingebaut. Der Kristallstrom wird mit einem Digitalmultimeter gemessen. Da sich der Widerstand des Einkristalles bei der Messung der Temperaturabhängigkeit um mehrere Größenordnungen verändert, muss der Kristallstrom durch Verwendung eines stromstabilisierten Versorgungsgerätes konstant gehalten werden. Der maximal zulässige Probenstrom ist im Datenblatt am Platz angegeben.

Die Messspannungen U_T , U_ρ , U_H und U_M werden bei der jeweils gewünschten Temperatur nacheinander an einem empfindlichen Digitalmultimeter ausgelesen. Die entsprechenden Verknüpfungen werden durch das elektronische Schaltgerät realisiert. In dieser Konfiguration ist eine Erfassung der Messwerte durch den Rechner, der über ein GPIB-Kabel mit dem Digitalmultimeter verbunden ist, möglich. Über das ebenfalls über ein GPIB-Kabel mit dem Rechner verbundene elektronische Schaltgerät können die Meßvorgänge vom PC aus gesteuert werden. Die Verschaltung der Messprobe und Geräte wird über Steckverbinder vorgenommen, die mit den im Schaltgerät befindlichen Karten verbunden sind.

Hinweis: Die elektrischen Verbindungen im Probenhalter können mit einem Handmultimeter (Widerstandsmessung) kontrolliert werden. Nach Aufbau der Versuchsschaltung lassen Sie bitte die Messanordnung **noch vor dem Einschalten des Probenstromes** von einem Praktikumsassistenten überprüfen.

Arbeitsschutz: Achten Sie auf den zuverlässigen Schutz vor gefährlichen Spannungen! Schaltungsänderungen bitte nur im spannungsfreien Zustand vornehmen.

5.5 Messung der Hall-Spannung

Die Hall-Spannung U_H sollte jeweils für beide Magnetfeldrichtungen gemessen werden. So lassen sich magnetfeldunabhängige Effekte (Sondenasymmetrie, Thermospannungen) eliminieren. Der Mittelwert der Hall-Spannung U_H wird durch Subtraktion der zusammengehörenden Messwerte unter Beachtung ihres Vorzeichens gebildet.

$$U_H = \frac{U_H^\uparrow - U_H^\downarrow}{2}$$

Hinweise: Vor Beginn der Messreihe ist der Kristallhalter der Messgeometrie entsprechend im Magnetfeld auszurichten. Wenn bei laufender Temperatur gemessen wird, unterscheiden sich die Temperaturen bei U_H^\uparrow und U_H^\downarrow . Zur Auswertung müssen die Messgrößen ggf. auf gleiche Temperatur interpoliert werden.

5.6 Messung des Ohmschen Spannungsabfalls

Der Ohmsche Spannungsabfall U_ρ sollte aus den jeweiligen Messwerten für beide Stromflussrichtungen unter Beachtung des Vorzeichens berechnet werden. So lassen sich Thermospannungen eliminieren.

5.7 Erprobung des Messaufbaus bei Zimmertemperatur

Programmieren Sie das elektronische Schaltgerät im lokalen Modus in der Art, dass die für die Messung des Hall-Effekts, der Leitfähigkeit, der Temperatur und des Magnetstroms notwendigen Schaltungen realisiert werden können. Protokollieren Sie die Schaltkonfigurationen und die Messwerte. Prüfen Sie, ob die Messwerte Ihren Erwartungen entsprechen (z.B. deren Abhängigkeit von Größe und Polung des Magnetfeldes). Der Magnetstrom soll in dieser Phase des Versuches am Umschaltgerät ein- und ausgeschaltet sowie umgepolt werden.

Schalten Sie dann den Steuerrechner ein, setzen das gewünschte Messprogramm in Betrieb und vergleichen Sie die Messwerte mit Ihren protokollierten Ergebnissen.

5.8 Abkühlung und Wiedererwärmung der Messprobe

Nach der Erprobung und der Messung bei Zimmertemperatur wird der zwischen den Magnetpolen befindliche Kryostat für die temperaturabhängigen Messungen vorbereitet. Vor Inbetriebnahme des Kryostaten lesen Sie bitte die Bedienungsanleitung und füllen gemäß Anleitung den Probenraum mit dem Austauschgas He. Während der Abkühlung können bereits Messungen zur Temperaturabhängigkeit durchgeführt werden. Die Versuchsanordnung gestattet es, die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes und der Hall-Spannung quasi gleichzeitig während eines Temperaturzyklus mit hoher Genauigkeit zu messen. Bei der Messung von U_T und U_ρ ist darauf zu achten, dass das Magnetfeld ausgeschaltet ist.

Hinweise: Der Kryostat wird mit ca. 2 l flüssigem Stickstoff langsam gefüllt. Temperaturen unter etwa 82 K werden durch Absaugen des gasförmigen Stickstoffs über der Flüssigphase (Siedepunkt unter Normaldruck: 77,3 K; Tripelpunkt: 63,14 K bei 125 mbar) bzw. über der festen Phase (z.B. bei 13 mbar 53,85 K; bei 1,3 mbar 46,9 K) erzeugt. Beim Abkühlen soll die Heizung für die Temperaturregelung ausgeschaltet sein (Heater off). Zur Messung von Temperaturabhängigkeiten beim Wiedererwärmen der Probe empfiehlt sich die Vorgabe einer Temperaturrampe (Temperaturänderung pro Zeiteinheit), die in der Regel ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Dauer ist.

Arbeitsschutz: Setzen Sie beim Einfüllen oder Umfüllen von flüssigem Stickstoff immer eine Schutzbrille bzw. einen Gesichtsschutz auf!

Die Kristallabmessungen und die Sondenabstände entnehmen Sie der Platzanleitung.

6. Für die Versuchsdurchführung benötigte Geräte

Für die Versuchsdurchführung stehen Ihnen folgende Geräte zur Verfügung:

Kristallprobe und Probenhalter

Flüssigstickstoff-Kryostat für variable Temperatureinstellung, ND700, NRD-143-DMB, Fa. Mossbauer

Spiromolekularpumpe LABOVAC 65 dry für das Isolationsvakuum des Kryostaten

Temperaturregler 321, Fa. Lake Shore

Vorvakuumpumpe RS 15, Fa. Vacuubrand und Feinvakuum-Meßgerät für das Gashandling

Elektromagnet

Magnetstromversorgung, Fa. Delta Elektronika (**Warnung vor gefährlicher Gleichspannung!**)

Magnetstromumschalter

Hall-Sonde und Teslameter Koshava 3

Digitalmultimeter hp 34401A

weitere Digitalmultimeter

Schaltgerät hp 3488A

stromstabilisierte Gleichspannungsquelle hp 6177C ($I_{P,max}$ gemäß Datenblatt der Proben beachten, **Warnung vor gefährlicher Gleichspannung!**)

PC zur Meßsteuerung und Meßwerterfassung

Handmultimeter

7. Aufgabenstellung

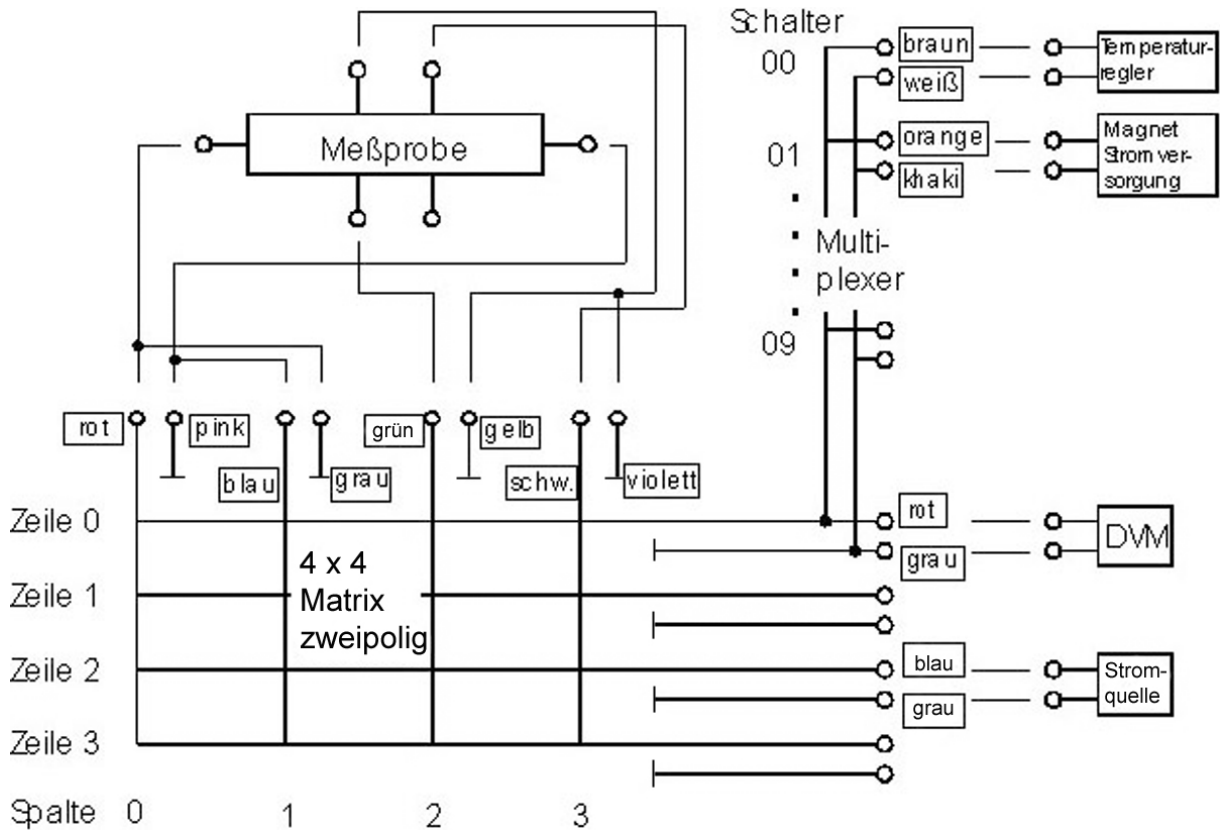
1. Machen Sie sich anhand der Bedienungsanleitungen mit den Geräten vertraut.
2. Eichen Sie den Elektromagneten.
3. Bereiten Sie den Messvorgang vor, indem Sie die Probe platzieren, die Voruntersuchung durchführen und den Kryostaten in Betrieb nehmen.
4. Messen Sie an einem Halbleiter-Einkristall
 - a) Die Temperaturabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ im Bereich von 300 K - 55 K,
 - b) die Hall-Konstante R_H in Abhängigkeit von der Temperatur im Bereich von 300 K - 55 K bei konstantem Magnetfeld.
5. Zeichnen Sie (als Bestandteil Ihres Messprotokolls) ein Schema der Messanlage mit allen Ihnen wichtig erscheinenden Details.
6. Stellen Sie graphisch die Abhängigkeiten $\ln \rho$, $\ln R_H$ und $\ln \{R_H^*(300/T)^{-3/2}\}$ über $1/T$ dar.
7. An den Kurven sind die Gebiete der Eigenleitung und der Störstellenerschöpfung auszuweisen. Das unterschiedliche Verhalten von $\rho(T)$ und $R_H(T)$ im Gebiet der Störstellenleitung und im Übergangsgebiet zur Eigenleitung ist zu erklären.
8. Aus den gemessenen Werten von R_H im Gebiet der Störstellenerschöpfung ist die Ladungsträgerkonzentration zu bestimmen (bei $T = 77$ K).
9. Erklären Sie den Vorzeichenwechsel von $R_H(T)$ bei höheren Temperaturen. Aus dem Verhalten von R_H im Übergangsgebiet von der Störstellen- zur Eigenleitung ist eine Schlussfolgerung über den Leitungstyp (n- oder p-Leitung) zu ziehen.
10. Aus den Eigenleitungsgeraden beider Abhängigkeiten $\ln(\rho) = f(1/T)$ und $\ln\{R_H^*(300/T)^{-3/2}\} = f(1/T)$ ist die Breite der verbotenen Zone (in eV) abzuschätzen.
11. Berechnen Sie die Beweglichkeit $\mu(T)$ (im Gebiet der Störstellenerschöpfung) und stellen Sie diese Abhängigkeit ($\lg \mu = f(\lg T)$) grafisch dar. Erklären Sie diese Abhängigkeit.
12. Berechnen Sie die Beweglichkeit der Majoritätsladungsträger bei $T = 77$ K. Schätzen Sie die Impulsrelaxationszeit ab.
13. Bestimmen Sie aus dem Extremwert der Hall-Konstanten $R_{H,ext}$ beim Übergang zur Eigenleitung und aus dem Sättigungswert der Hall-Konstanten $R_{H,S}$ im Gebiet der Störstellenerschöpfung das Beweglichkeitsverhältnis $b = \mu_n/\mu_p$ mit Hilfe der Formel

$$b = 1 - 2 \frac{R_{H,ext}}{R_{H,S}} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{R_{H,S}}{R_{H,ext}}} \right),$$

die für schwache Magnetfelder gültig ist. Versuchen Sie die Herleitung dieser Beziehung aus dem allgemeinen Ausdruck für die Hall-Konstante bei mehreren Trägersorten.

Anlage zu 5. Weitere Hinweise:

Verbindung der Meßprobe mit der Stromquelle und dem Digitalvoltmeter über ein Schaltgerät (Scanner), Möglichkeit der Messung mit einem PC:



Die Verschaltung ist ein Vorschlag. Ein vorhandenes Messprogramm bezieht sich auf diesen Vorschlag. Die offenen Ende liegen sämtlich auf dem gleichen Potential.

Der Scanner verfügt über 3 Schalteinheiten, die in den Steckplätzen (Slots) 2, 3 und 5 sitzen. Die Matrixkarte hp 44473A im Slot 3 mit vier Zeilen und vier Spalten stellt wahlweise die Verbindungen zur Messprobe her. Jeder Knoten der Matrix ist ein zweipoliger Schalter. Die Multiplexkarte hp 44470A im Slot 2 schaltet weitere Messspannungen zweipolig auf das Digitalvoltmeter. Mit der Schalterkarte hp 44471A im Slot 5 wird der Magnetstrom über die digitalen Eingänge der Magnetstromversorgung wahlweise mit den Stromrichtungen + oder - eingeschaltet.

Hinweise zur Benutzung des Schaltgerätes von Hewlett & Packard Typ hp 3488A

Betreiben Sie in der Erprobungsphase das Schaltgerät manuell.

Schließen von Kontakten: Drücken der Taste CLOSE, Drücken der Zifferntasten für den Slot (k), $k = 2, 3$ und 5 , und für den Kanal (lm) des Multiplexers, $lm = 00 \dots 09$, bzw. den Kreuzungspunkt (lm) der Matrix, wobei $l = 0 \dots 3$ die Zeile und $m = 0 \dots 3$ die Spalte angibt. Sollen mehrere Verbindungen mit einem Befehl geschlossen werden, sind die Angaben durch Komma zu trennen. Fehleingaben können mit den Tasten BACK_SPACE und CLEAR_DISPLAY korrigiert werden. Abschließend Drücken der Taste EXECute. Analog werden geschlossene Kontakte beginnend mit dem Befehl OPEN geöffnet. Mit der Taste RESET werden alle Kontakte geöffnet, mit der Taste CARD_RESET und nachfolgender Slotangabe (k) werden alle Kontakte der Karte im Slot k geöffnet.

Bis zu 40 verschiedene Schaltkonfigurationen können mit dem Programm STORE gespeichert werden. Dazu werden nacheinander die Taste STORE, die Zifferntasten - wahlweise 1 ... 40 - und die Taste EXECute betätigt.

Eine gespeicherte Schaltkonfiguration wird mit dem Programm RECALL aufgerufen: Taste RECALL, Zifferntasten - wahlweise 1 ...40, Taste EXECute.

Mit dem in Power-Basic geschriebenen Messprogramm, das als Quelldatei unter C:\PBasic\Praktik\hp_msv_2.bas abgespeichert ist, kann das Schaltgerät vom PC aus gesteuert werden. Außerdem werden die vom Digitalvoltmeter hp 34401A aufgenommenen Messwerte an den PC übergeben.

Hinweise zur Benutzung des Programms für eine teilautomatisierte Messung der Temperaturabhängigkeit von Halleffekt und Widerstand

Über das Benutzermenü im Norton-Commander wird das Programm unter "Temperaturabh. mit MSV +HP-Scanner" gestartet. Nach dem Programmstart werden Sie aufgefordert, einen Dateinamen einzugeben, unter dem die Messwerte nach jedem Messzyklus abgelegt werden. Dann starten Sie die Messreihe. Pro Messzyklus werden 6 Messungen durchgeführt. In einer Datei können maximal 500 Zyklen gespeichert werden. Das Programm stoppt am Ende eines Messzyklus, wenn eine beliebige Taste betätigt wurde.

Die Messungen bedeuten:

MS1: Temperatur-Spannung

MS2: Spannungsabfall über die beiden Leitfähigkeitsanschlüsse der Probe bei einer Stromrichtung ($I_P = +$)

MS3: Spannungsabfall über die beiden Hall-Anschlüsse der Probe bei der Stromrichtung $I_P = +$ und der Magnetfeldpolung $B = \uparrow$

MS4: Spannungsabfall über die beiden Leitfähigkeitsanschlüsse der Probe bei entgegengesetzter Stromrichtung ($I_P = -$)

MS5: Spannungsabfall über die beiden Hall-Anschlüsse der Probe bei der Stromrichtung $I_P = +$ und der Magnetfeldpolung $B = \downarrow$

MS6: Spannungsabfall proportional zum Magnetstrom

Bei Temperatur- und bei Leitfähigkeitsmessungen muss das Magnetfeld ausgeschaltet sein. Auf- und Abbau des Magnetfeldes dauern etwa 3 s. Der Probenstrom wird nicht automatisch gemessen. Nach Beendigung der Messreihe können Sie die Daten zur weiteren Auswertung auf eine Diskette überspielen oder sich per E-Mail zuschicken lassen. Ihre Messwerte finden Sie unter C:\DATEN\Dateiname.