

Festkörperelektronik und -photonik

Versuch: Hall - Effekt

1. Versuchsziel: Kennenlernen von Leitungsvorgängen in Halbleitern bei Einwirkung eines Magnetfeldes.

2. Vorbereitungshinweise

2.1. Schwerpunkte:

Machen sie sich mit folgenden Begriffen und Schwerpunkten vertraut:

- Bändermodell
- Transportvorgänge im Festkörper
- Geschwindigkeit eines Elektrons, Kristallimpuls, Beschleunigung des Kristallelektrons, eff. Masse, Leitfähigkeit, Transportgleichung
- galvanomagnetische Effekte
- Berechnung eines Magnetfeldes (ind. Spannung, Doppelleitungstheorie, ..)

2.2 Vorbereitungsaufgaben:

- 1) Welche Transporterscheinungen unter Einwirkung eines Magnetfeldes kennen Sie?
Erklärung Sie diese! (mündl.)
- 2) Erläutern Sie die Begriffe : Magnetowiderstand, planarer Hall - Effekt, Transversal- und Logitudinaleffekte! (schriftl.)
- 3) Nennen Sie Anwendungsgebiete bei den der Hall - Effekt genutzt wird! (mündl.)
- 4) Leiten Sie die Gleichung zur Bestimmung der Hall- Beweglichkeit von Ladungsträgern her!
(Gehen Sie dabei von der Hall-Spannung aus über die Bestimmung der Ladungsträgerkonzentration) (schriftl.)
- 5) Erklären Sie den Begriff galvanomagnetischer Effekt! (mündl.)
- 6) Berechnen Sie die Trägerkonzentration und die Hall - Beweglichkeit für eine n-leitende HL- Probe, wenn folgende Größen bekannt sind:

$$b=4\text{mm (Breite),}$$

$$d=1.5\text{mm (Dicke)}$$

$$I=1.5\text{mA}$$

$$B=2000\text{T}$$

$$U_H=5.65\text{mV}$$

$$\zeta=35\ \Omega\text{cm (schriftl.)}$$

3. Grundlagen

Der Hall-Effekt, so benannt nach dem amerikanischen Physiker E.H. Hall¹, wurde erstmals an dünnen Goldschichten entdeckt und erklärt das Auftreten einer zum elektrischen Stromfluß transversalen Spannung in einem wiederum dazu transversalen Magnetfeld (siehe Abb. 1).

Bei Anwesenheit eines äußeren Magnetfeldes wirkt auf die sich bewegenden Ladungsträger die Lorenz-Kraft. Sie steht senkrecht auf der Bewegungsrichtung der Ladungsträger und der magnetischen Induktion. Deshalb ist die Bewegung in den verschiedenen Richtungen unterschiedlich, und selbst ein Halbleiter, der bei Abwesenheit eines Magnetfeldes isotrop ist, wird anisotrop. Dieser Umstand führt zum Auftreten galvanomagnetischer Erscheinungen. Zu deren wichtigsten gehören der Hall - Effekt und die magnetische Widerstandsänderung.

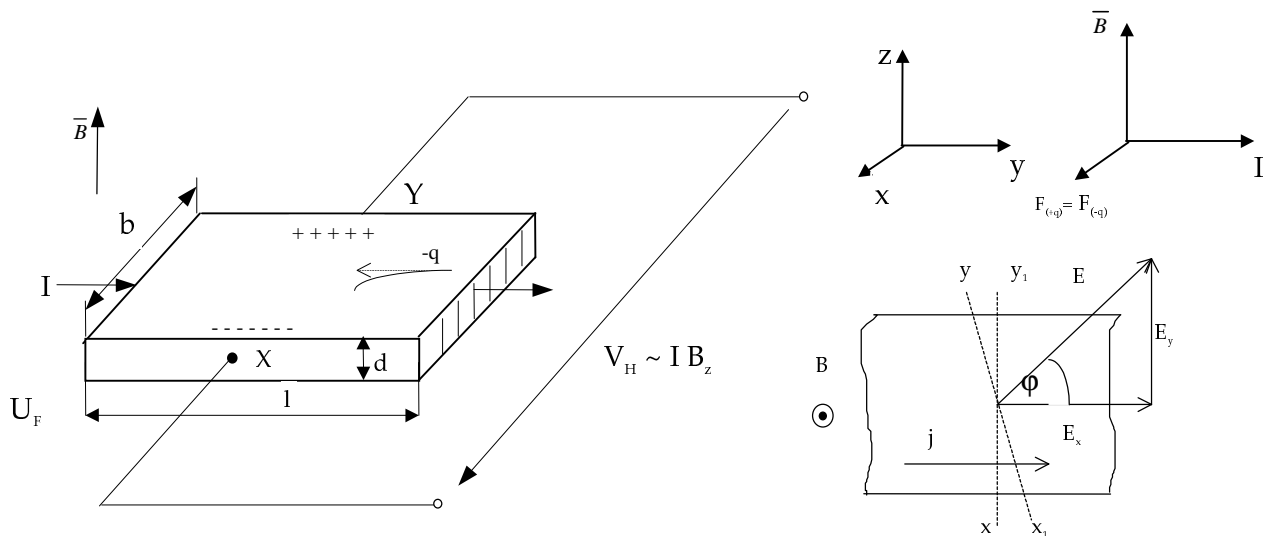


Abb. 1 Hall - Effekt an einem langgestreckten elektrischen Leiter mit vorzugsweiser Elektronenleitung

Wir betrachten dazu einen homogenen und isotropen Leiter in Form eines kleinen Quaders, an dessen Stirnflächen Elektroden angebracht sind. Die Achsen eines rechtwinkligen Koordinatensystems seien parallel zu den Kanten des Quaders gelegt, und es sei vorausgesetzt, daß der Stromdichtevektor „ \mathbf{j} “ parallel zur x-Achse und die magnetische Induktion „ \mathbf{B} “ in Richtung der z-Achse liegen. Ohne äußeres Magnetfeld haben die elektrische Feldstärke „ \mathbf{E} “ und die Stromdichte „ \mathbf{j} “ im Leiter die gleiche Richtung. Der Potentialunterschied zwischen den Kontakten X und Y in einer zu „ \mathbf{j} “ senkrechten Ebene ist gleich Null. Beim Einschalten eines transversalen Magnetfeldes tritt zwischen den Kontakten X und Y eine Potentialdifferenz auf, die beim Umkehren der Stromrichtung oder beim Umpolen des Magnetfeldes ihr Vorzeichen ändert. Das Auftreten dieser Potentialdifferenz zeigt, daß beim Vorhandensein eines Magnetfeldes im Leiter ein zusätzliches elektrisches Feld „ \mathbf{E}_y “ entsteht. Die Richtung des resultierenden elektrischen Feldes „ \mathbf{E} “ fällt nun nicht mehr mit der Richtung von „ \mathbf{j} “ zusammen, sondern ist relativ zu „ \mathbf{j} “ um einen gewissen Winkel „ ϕ “ gedreht, der die Bezeichnung Hall-Winkel trägt. Die Äquipotentialflächen, die ohne Magnetfeld zu „ \mathbf{E}_x “ senkrechte Ebenen waren (eine davon ging durch die Punkte X und Y), sind jetzt senkrecht zu „ \mathbf{E} “, also ebenfalls um den Winkel „ ϕ “ gedreht (x_1, y_1 in Abb. 1).

Da „ \mathbf{B} “ in die z-Richtung weist, so verläuft „ \mathbf{F}_B “ parallel zur negativen y-Achse. Da die Probe in der y-Richtung begrenzt ist, bewirkt die Kraft „ \mathbf{F}_B “ jedoch nur eine geringfügige Verschiebung der Ladungsträger, denn die Ladungsträgeranhäufung an den Grenzflächen bauen ein elektrisches Gegenfeld, das „Hall - Feld“ „ $\mathbf{E}_y = \mathbf{E}_H$ “ auf.

¹ E.H. Hall „New Action of the Magnet on Electric Currents“, Amer. J. Math. 2 (1879), p. 287 ff.

Für Elektronen im sich einstellenden Gleichgewicht gilt:

$$\mathbf{F}_B - e \mathbf{E}_H = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_H = + \frac{1}{en} (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) = - R_H (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

Für die Hall - Spannung „ U_H “ an den Kontakten X und Y gilt dann:

$$U_H = \mathbf{E}_H b = R_H \frac{i \cdot B}{d} . \quad (3)$$

Die Driftgeschwindigkeit „ v_D “ wird dabei mit :

$$v_D = \frac{i}{e \cdot n \cdot A} \quad \text{berücksichtigt.} \quad (4)$$

Dabei bedeuten d die Dicke der Probe, b deren Breite (in Richtung des Magnetfeldes), i die Gesamtstromstärke und R_H einen Proportionalfaktor, der bei schwachen Magnetfeldern nicht von der magnetischen Induktion abhängt und Hall - Konstante genannt wird.

Von den jeweiligen Versuchsbedingungen unabhängig ist dabei die Hall - Konstante:

$$R_H = \frac{1}{e \cdot n} . \quad (5)$$

Das Vorzeichen von Hall-Winkel und Hall-Konstante hängt vom Vorzeichen der Ladung der beweglichen Teilchen ab, die die elektrische Leitfähigkeit hervorrufen. Wenn die magnetische Induktion in z -Richtung zeigt und die bewegten Teilchen positive Ladung tragen, dann zeigt die Lorenz-Kraft

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (6)$$

bei der angegebenen Stromrichtung nach unten. Die untere Grenzfläche des Kristalls wird positiv, die obere negativ aufgeladen. Das resultierende elektrische Feld „ \mathbf{E} “ wird entgegen dem Uhrzeigersinn relativ zur Stromdichte „ \mathbf{j} “ gedreht. In diesem Fall ist es üblich den Hall-Winkel und die Hall-Konstante positiv zu zählen.

(Positive Ladungsträger (Löcher, anomaler Hall - Effekt) laufen jedoch in die entgegengesetzte Richtung, werden aber auch entgegengesetzt, also in gleicher Richtung wie Elektronen, abgelenkt. Damit kehrt die Hall - Spannung ihr Vorzeichen um.)

Bei negativ geladenen Teilchen ist die Kraft „ \mathbf{F} “ ebenfalls nach unten gerichtet, jedoch wird die untere Grenzfläche des Kristalls negativ aufgeladen, und das Hall-Feld „ \mathbf{E}_y “ ändert sein Vorzeichen. Dementsprechend ist das Feld „ \mathbf{E} “ im Uhrzeigersinn gedreht und φ und R_H sind negativ.

(Sind die Ladungsträger negativ (Elektronen, normaler Hall - Effekt), so ergibt sich die Polarität von U_H bei konventioneller Stromrichtung i , wie in Abb. 1 angegeben ist; R_H wird dabei mit negativen Vorzeichen versehen.)

Zudem ermöglicht die Messung der Hall- Konstante die Bestimmung der Dichte „ n “ der Ladungsträger, sofern der Effekt nicht durch Nebenwirkungen gestört wird.

Bestimmt man die Hall-Konstante nach Gl. (3), so kann die Ladungsträgerdichte „ n “ der Probe bestimmt werden.

Mit Hilfe der Leitfähigkeit σ , die aus Strom und Spannung bestimmt werden kann, erhält man die Beweglichkeit „ μ “ aus :

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu_H \quad (7)$$

mit
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (8)$$

Zur Unterscheidung von der durch das Verhältnis Driftgeschwindigkeit zu Feldstärke definierten Driftbeweglichkeit μ , wird die mittels Hall-Effekt ermittelte Beweglichkeit *Hallbeweglichkeit* μ_H genannt.

Magnetische Widerstandsänderung (Magnetowiderstand).

Ein äußeres Magnetfeld ruft nicht nur das Entstehen eines Hall-Feldes E_y hervor, sondern ändert auch den Strom i_x . Das bedeutet, daß sich in einem transversalen Magnetfeld der Widerstand eines Leiters ändert. Die magnetische Widerstandsänderung resultiert unmittelbar daraus, daß die Leitfähigkeit im Magnetfeld Tensorcharakter (i. all. Fall wird dabei der Ladungstransport nicht mehr durch einen einzigen kinetischen Koeffizienten, sondern durch die Gesamtheit der Koeffizienten bestimmt, die die Komponenten eines Tensors zweiter Stufe darstellen) annimmt. Deshalb kann man den Magnetowiderstand wie den Hall-Winkel über die Elemente dieses Tensors ausdrücken.

Der Hall-Effekt findet verschiedene technische Anwendungen. Er kann zur Messung der magnetischen Feldstärke oder, wenn diese bekannt ist, zur Messung der Stromstärke und der Leistung genutzt werden. Mit Hilfe des Hall-Effekts lassen sich elektrische Schwingungen erzeugen, modellieren und demodellieren, eine Gleichrichtung von Schwingungen erzeugen, elektrische Signale verstärken und andere technische Probleme lösen (z. B. Abstandsmessung, Kontaktstückloser Schalter).

Die Erklärung der Transporterscheinungen bei Anwesenheit eines Magnetfeldes über die Boltzmann - Gleichung finden Sie ausführlich in /1/. Weiterführende und vertiefende Literatur : siehe Punkt 5.

4. Versuchsdurchführung des Versuches Halleffektsensor

Verwendetes Bauelement: Positionssensor KSY 13 (Siemens)

Der Positionssensor KSY 13 ist ein mittels Ionen-Implantation hergestellter Hall-Generator, der auf monokristallines GaAs aufgebracht ist.

Der Sensor arbeitet mit einem konstanten Versorgungsstrom. Die zu messende Hall-Spannung ist direkt proportional zum magnetischen Feld, welches auf den Sensor einwirkt. Dieser Sensor zeichnet sich besonders durch eine hohe Magnetfeldempfindlichkeit und dem sehr geringen Temperaturkoeffizienten aus.

Das aktive Gebiet des GaAs - Chips beträgt 0,2 mm x 0,2 mm und befindet sich 0,3 mm unterhalb der Plastoberfläche. Der Chipträger ist leicht magnetisch.

Absolute Grenzwerte:

max. Speisestrom	7 mA
Betriebstemperaturbereich	-40°C bis +150°C
Lagertemperaturbereich	-55°C bis +160°C
interner Widerstand:	900 .. 1200Ω (Berechnung mit 1KΩ durchführen)

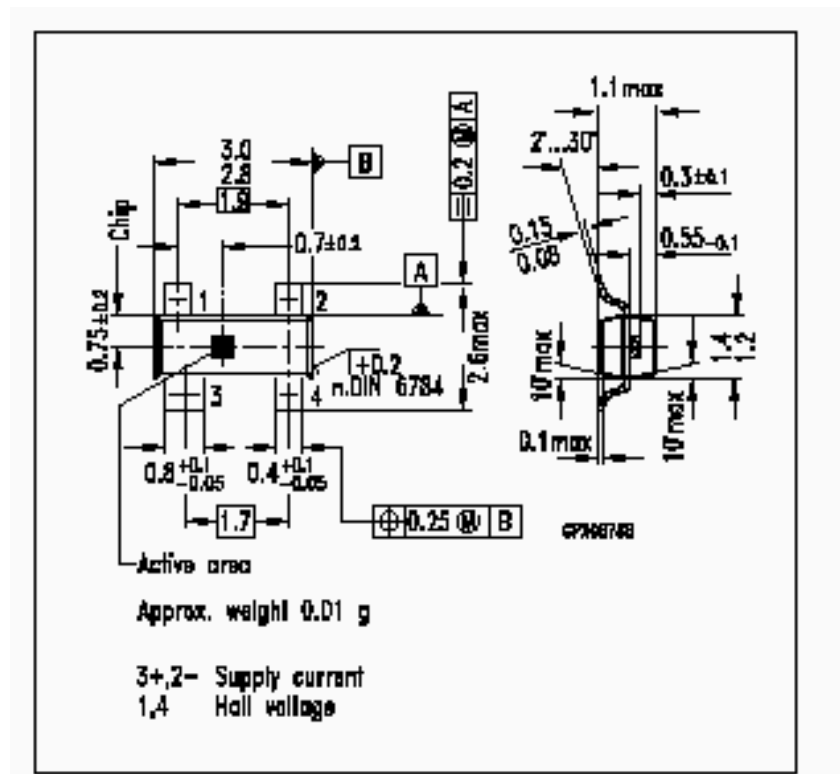


Bild 1 Abmessungen und Anschlüsse des KSY 13

Spulengeometrie:	N = 940	Windungszahl
	D = 87 mm	Durchmesser der Spule
	l = 45,5 cm	Länge der Spule

4.1. Versuchsaufbau:

Die Beschaltung des Bauelementes erfolgt entsprechend der am Versuchsplatz ausliegenden Anleitung.

1. **Aufnahme der Ausgangskennlinie des Bauelementes in Abhängigkeit von der Magnetfeldstärke H .**

Aus den gegebenen Spulengeometrien und der Stromstärke ist die Magnetfeldstärke zu berechnen. Verändern Sie die Feldstärke durch Einstellen des Spulenstromes ($I_{Sp} = 0.5, 1.5$ und 2.5 A) und messen Sie die Ausgangsspannung des Bauelementes (Meßbereiche siehe Auslage am Versuchsplatz). Stellen Sie die Ergebnisse grafisch dar !

2. **Überprüfung des Magnetfeldes in der Spule - quantitativ.**

Messen Sie die Homogenität des Magnetfeldes in der Spule. Messen Sie dabei an 5 selbstgewählten Punkten in der Spule die Ausgangsspannung und berechnen Sie daraus die Magnetfeldstärke an den Messpunkten. Stellen Sie das Ergebniss graphisch dar !

3. **Radiale Abstandsmessung**

Hierbei bewegt sich der Hallsensor vom Spulenanfang nach außen weg. Messen Sie die Ausgangsspannung (bei $I_{Sp} = 1.5$ A) in Abhängigkeit der Entfernung von der Spule und stellen Sie das Ergebnis grafisch dar.

4. **Ermitteln Sie aus den unter 1. und 2. gewonnenen Werten die Hallbeweglichkeit μ_H .**

Benutzen Sie dabei folgende Reihenfolge:

Magnetflußdichte B - Hallkonstante R_H - Ladungsträgerkonzentration n_e - Hallbeweglichkeit μ_H .

5. Literaturverzeichnis

- /1/ Ch. Weißmantel, C. Hamann: „Grundlagen der Festkörperphysik“
Springer - Verlag, 1980
- /2/ R. Paul: „Halbleiterphysik“
Verlag Technik Berlin, 1974 (und neuere Auflagen)
- /3/ H. Lippmann: „Physikalische Grundlagen elektronischer Bauelemente“
Lehrbriefe TU-Chemnitz (5. Lehrbrief, 1. veränderte Ausgabe), 1986
(erhältlich bei Prof. Ebest)
- /4/ Shyh, Wang: „Fundamentals of Semicondunktor Theory and Device Physics“
Prentice Hall, Engelwood Cliffs, New Jersey 07632; 1989
- /5/ K.H. Hellwege: „Einführung in die Festkörperphysik“
Springer Verlag; 1981
- /6/ V.L. Bonc - Brueric, S.G. Kalasnikov: „Halbleiterphysik“
Verlag der Wissenschaften; 1982
- /7/ H. Lindner: „Grundriß der Festkörperphysik“
Fachbuchverlag Leipzig, 1978