

Laboratorio di Fisica 3

L' effetto Hall

Materiale occorrente

- lastra semiconduttrice (Ga As) di tipo n montata su circuito stampato;
- apparato Pasco a tre sezioni (generatore di corrente, alimentatore di tensione/amperometro e voltmetro);
- bobina e nucleo ferromagnetico;
- sonda di campo magnetico a 2 assi;
- interfaccia Pasco 550 con portatile;
- multimetro digitale;
- portatile con driver per acquisizione (Capstone).

1 Obiettivo

Scopo di questa esperienza è la verifica dell' effetto Hall, ovvero la comparsa, in una lastrina conduttrice percorsa da corrente, di un campo elettrico (e quindi di una differenza di potenziale, detta "tensione di Hall") mutuamente ortogonale sia alla direzione della corrente che vi fluisce che a quella di un campo magnetico applicato. Il campo elettrico, indotto dallo spostamento medio laterale dei portatori di carica nel conduttore quale risultato dell'equilibrio tra la forza di Lorentz (di intensità proporzionale alla velocità degli stessi nonché al campo stesso) ha verso dipendente dal segno dei portatori di carica e modulo direttamente proporzionale all' intensità di corrente ed al modulo del campo magnetico.

2 Descrizione dell' esperimento

2.1 Schema concettuale e principio di misura

Un disegno schematico dell' apparato e dello schema delle connessioni è mostrato in figura 1 (ATTENZIONE! Si tratta di uno schema concettuale. Per una descrizione dell' apparato si faccia riferimento ai successivi paragrafi 2.2 e 2.3). Su una lastrina semiconduttrice di lunghezza w , larghezza b e spessore d si stabilisce parallelamente al primo una corrente elettrica I_S erogata da un generatore di tensione continua U_0 chiuso su un amperometro. Un campo magnetico \vec{B} orientato lungo d (e verso entrante nel foglio) esercita sui portatori maggioritari una forza di Lorentz \vec{F}_L diretta lungo b verso l' alto, indipendentemente dal segno delle cariche. Lo spostamento di queste determina una variazione della loro densità e la comparsa di un campo elettrico di forza \vec{F}_e diretta verso il basso così da controbilanciare la forza di Lorentz e, di conseguenza, una d.d.p. U_H (la tensione di Hall) tra le superficie in alto e quella in basso, positiva (rispettivamente negativa) nel caso di portatori maggioritari positivi (negativi) come mostrato nell' immagine a destra (sinistra) in figura 1.

All' equilibrio tra le due forze risulta pertanto per ciascun portatore di carica $evB = eE$ da cui (con ovvio significato dei simboli)

$$U_H = bE = bvB \quad (1)$$

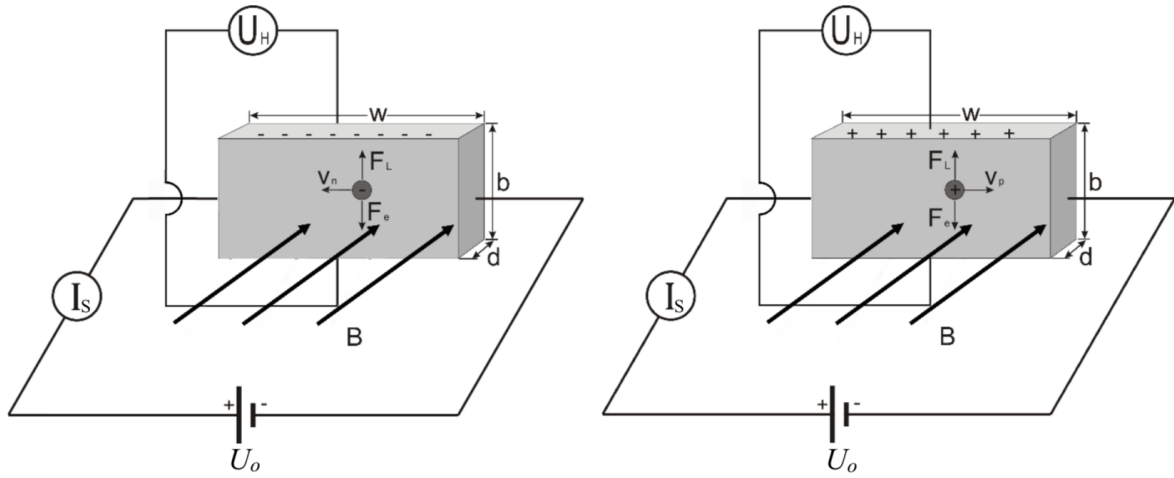


Fig. 1: Diagramma delle velocità e delle forze agenti sui portatori di carichi negativi (sinistra) e positivi (destra) lungo il lato principale di una piastrina. Ne consegue un differente segno della tensione di Hall U_H tra i contatti ohmici sulle superfici in alto ed in basso.

La velocità media dei portatori di carica, nell' ipotesi che la concentrazione dei portatori maggioritari sia molto maggiore di quelli minoritari, può a sua volta essere espressa in termini dell' intensità di corrente erogata dal generatore nella forma

$$I_S = nevS = nebdv \Rightarrow U_H = \frac{BI_S}{ned} \quad (2)$$

n essendo la densità volumetrica dei portatori di carica ed $S = bd$ una sezione della lastrina ortogonale alla densità di corrente. In forma alternativa la tensione di Hall può essere fattorizzata e riscritta nella forma

$$U_H = r_H \frac{BI_S}{d} \quad (3)$$

laddove $r_H = 1/(ne)$ è il cosiddetto coefficiente di Hall specifico del materiale (indipendente cioè dalle condizioni di misura e dalla sua geometria).

In sommario, il segno della tensione di Hall è correlato al segno dei portatori di carica ed il suo valore assoluto direttamente proporzionale alla corrente ed all' intensità del campo magnetico. Questa proprietà lo rende particolarmente utile nella realizzazione di sonde di campo magnetico (sonde di Hall) in cui dalla misura della tensione di Hall, note le caratteristiche del semiconduttore e l' intensità di corrente che l' attraversa, è possibile misurare la componente del campo ortogonale.

2.2 L' apparato sperimentale

Una verifica delle 2, 3 può essere ottenuta sperimentalmente utilizzando l' apparato Pasco SE-7260[1] mostrato in figura2.

2.3 Orientazione di campo, corrente, tensione

In figura 3 è riportata un' immagine ingrandita della parte terminale del circuito stampato, in cui sono visibili il semiconduttore ed una serigrafia con dettagli sul verso della corrente (orientata in verticale

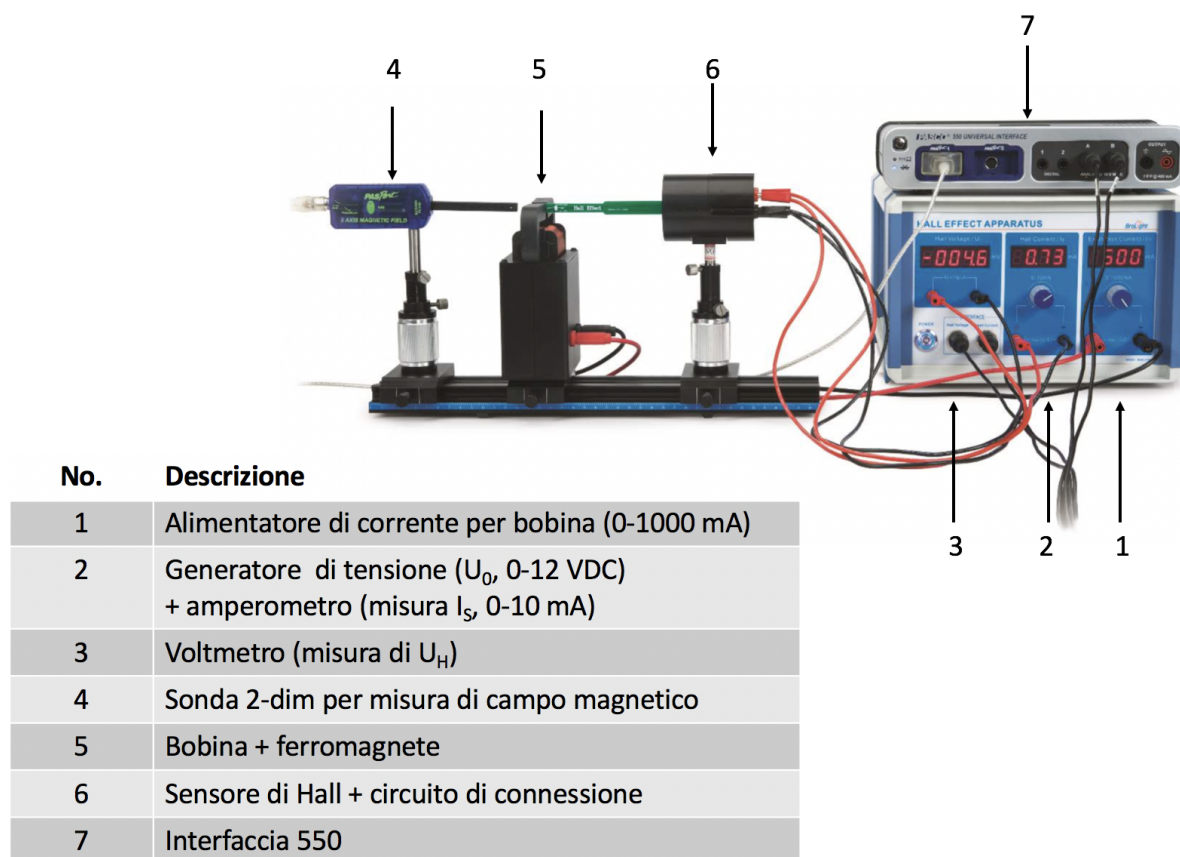


Fig. 2: Apparato Pasco per la misura dell' effetto Hall, con descrizione delle sue parti.

dall' alto in basso) e sul segno dei terminali della tensione di Hall. Il verso del campo (ortogonale ed uscente dal foglio) è tale che la forza di Lorentz sia diretta orizzontalmente verso il lato di sinistra, che è in contatto ohmico con il terminale positivo di U_H . Pertanto il segno della misura della tensione di Hall è concorde con quello dei portatori maggioritari nel semiconduttore.

3 Procedura

3.1 Calibrazione del campo magnetico

Poiché la sonda ed il semiconduttore non possono alloggiare simultaneamente nel traferro della bobina, occorre effettuare preliminarmente una calibrazione della sonda, ovvero determinare una relazione lineare tra la corrente I_M che fluisce nella bobina (corrente di eccitazione, "Excitation Current") e l' intensità del campo magnetico misurata dalla sonda. A questo scopo si suggerisce di procedere attraverso i seguenti passi.

- 1) Accendere l' apparato Pasco e l' interfaccia, avendo verificato che tutti i connettori siano correttamente inseriti ed al momento tenendo inattivi tutti i generatori.

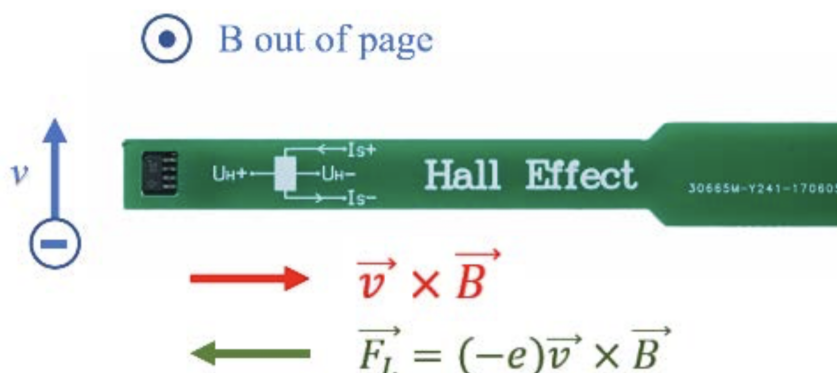


Fig. 3: Immagine del semiconduttore e della serigrafia con indicazione del verso della corrente e dei terminali della tensione di Hall. Il verso indicato per le velocità si riferisce al caso di portatori di carica negativi.

- 2) Accendere il portatile, fare login (user studenti) ed aprire una sessione di Capstone (link sul Desktop).
- 3) Verificare la connessione USB dell'interfaccia cliccando su "Hardware Setup" (icona in alto a sinistra): dovrà apparire in pop-up un' immagine dell' interfaccia ed una lista delle connessioni attive (sonda di campo e sensori di corrente e tensione di Hall).
- 4) Aprire un display digitale da pannello di Capstone (doppio-click su bottone "Digits" collocato a destra, terzo dall'alto): cliccare "Select Measurements" sul display (in alto a sinistra) per visualizzare la componente perpendicolare del campo (si consiglia a questo punto di cliccare sulla T per modificare le unità di misura in Gauss).
- 5) Cambiare lo stato di sampling in "Keep mode" (terzo bottone in basso da sinistra), quindi premere il testo di Preview accanto (a questo punto dovreste poter visualizzare la lettura della sonda).
- 6) Muovere i supporti sulla guida per collocare la parte terminale della sonda (laddove è posizionato il sensore di campo) all' interno del traferro¹.
- 7) Con $I_M = 0$, premere il testo "TARE" sulla sonda e verificare l' effettivo azzeramento della lettura sul display (a parte fluttuazioni di decimali).
- 8) A questo punto alimentare la bobina regolando la corrente di eccitazione I_M a valori progressivamente crescenti, ruotando l' apposita manopola in senso orario e, procedendo a passi di 50-100 mA (e fino ad un massimo di 1A), registrare i valori di corrente e campo in una tabella.
- 9) Verificare la linearità della relazione corrente-campo ed effettuare un' interpolazione lineare dei dati acquisiti.
- 10) Riportare infine la corrente di eccitazione a zero e rimuovere definitivamente la sonda dal traferro.

¹ Per una regolazione fine della posizione del sensore può essere conveniente eccitare la bobina ad una corrente $I_M \sim 100mA$ e muovere la sonda lungo i binari della guida fino a massimizzarne la lettura.

4 Misure di tensione di Hall in funzione della corrente

A questo punto collocare il semiconduttore al centro del traferro, anche in questo caso ottimizzando la posizione sulla base di letture strumentali².

4.1 Misura di zero e compensazione

Anche in assenza di effetto Hall, è possibile riscontrare una piccola ma significativa variazione di U_H per effetto di un possibile disallineamento dei terminali di U_H , che potrebbero essere stati saldati non esattamente da parte opposta del semiconduttore (come mostrato in figura 4). Per quantificare l'effetto

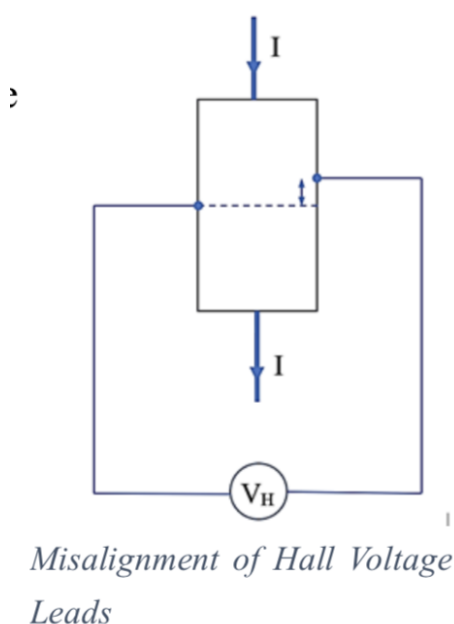


Fig. 4: Disallineamento dei contatti sul semiconduttore dei terminali della tensione di Hall.

e compensarlo nelle successive misure, fissata $I_M = 0$, si consiglia di misurare U_H al variare di I_S tra 0 e 10 mA (a passo di 1 mA). Dalla pendenza della retta di best-fit dei dati registrati determinare il rapporto U_H/I_S in assenza di campo (evidentemente correlata alla resistenza del semiconduttore vista dai due terminali di U_H) e, confrontandola con la resistenza “totale” del semiconduttore U_0/I_S , si dia una stima approssimativa del disallineamento. Di seguito, per ogni successiva misura ottenuta ad un fissato valore di corrente I_S , si sottragga l'extrapolazione di U_H a campo nullo (ottenuta a partire dai parametri di best-fit) dal valore misurato di U_H .

4.2 Misura di U_H in funzione di I_S (a campo costante)

Ripetere la stessa procedura descritta al paragrafo precedente per alcuni valori di campo (ad esempio corrispondenti ad $I_M = 300, 500, 700$ mA), riportando le misure in un opportuno grafico (come quello di

² In questo caso è possibile fare affidamento su una misura di U_H a valori fissati di $I_M = 100$ mA $\Rightarrow \gtrsim 100$ G e di corrente $I_S = 5$ mA. Per una regolazione fine della posizione si consiglia di muovere il supporto del semiconduttore sulla guida finché U_H non risulti massima.

5). Per ciascun valore del campo magnetico:

- verificare la linearità di U_H in funzione di I_S ed effettuare un' interpolazione dei dati ottenuti;
- al netto della compensazione di cui sopra, determinare la vostra migliore stima del rapporto U_H/I_S con il relativo errore;
- dalla (3), moltiplicando per lo spessore d della lastrina e dividendo per il campo (a sua volta determinato a partire dal valore della corrente), ottenere una misura del coefficiente di Hall r_H per la lastrina.

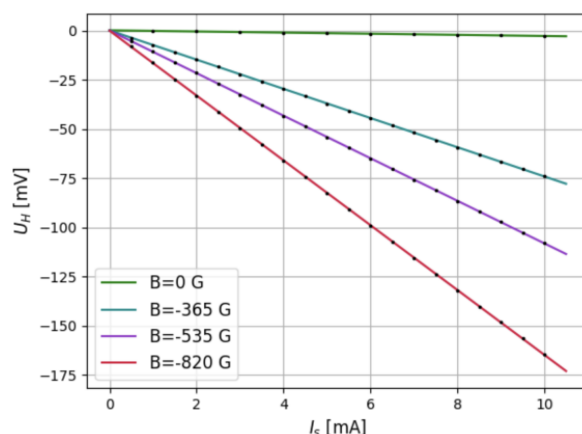


Fig. 5: Andamento della tensione di Hall in funzione della corrente nel semiconduttore per alcuni valori del campo (incluso quello misurato a campo nullo).

4.3 Misura di U_H in funzione di B (a corrente di Hall costante)

Ripetere la stessa procedura descritta ai paragrafi precedenti, questa volta tenendo costante la corrente di Hall (ad esempio fissandola di volta in volta a 3, 5, 7 mA) e variando la corrente di eccitazione della bobina. Per ciascun valore di I_S :

- verificare la linearità di U_H in funzione di B ed effettuare un' interpolazione dei dati ottenuti, avendo sottratto ad ogni valore misurato di U_H il corrispondente valore di compensazione a quella determinata corrente;
- determinare la vostra migliore stima del rapporto U_H/B con il relativo errore;
- di nuovo dalla (3), moltiplicando per lo spessore d della lastrina e dividendo per I_S , ottenere una misura del coefficiente di Hall.

Per ogni valore di corrente I_S utilizzare inoltre il multimetro digitale per misurare U_0 , ovvero la f.e.m. del generatore di tensione, verificando che sia pressoché indipendente dal campo. Dal rapporto U_0/I_S determinare la resistenza R_w del semiconduttore (vista dal generatore).

5 Determinazione delle caratteristiche del semiconduttore

5.1 Densità dei portatori maggioritari

Calcolare una media pesata dei valori di r_H precedentemente ottenuti e da questa stimare il valore della densità dei portatori maggioritari di carica nel semiconduttore.

5.2 Conducibilità

Dalla misura della resistenza R_w e dai dati geometrici della lastrina, ottenere una stima della sua conducibilità elettrica

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{w}{bdR_w} \quad (4)$$

5.3 Motilità dei portatori maggioritari

Per definizione la motilità μ_n dei portatori maggioritari di carica sotto l'azione di un campo elettrico è il rapporto tra la loro velocità aregime e l'intensità del campo stesso. Essa è perciò legata alla concentrazione dei portatori maggioritari ed alla conducibilità dalla relazione

$$\sigma = ne\mu_n \quad (5)$$

da cui invertendo e sostituendo le espressioni precedentemente ottenute risulta

$$\mu_n = \frac{\sigma}{ne} = \sigma r_h \quad (6)$$

Appendice A: incertezze sulle misure

Per le misure di tensione/corrente riportate dai display valgono le stesse incertezze dei multimetri digitali, ovvero $0.5\%(\text{lettura}) \oplus 2 \text{ digits}$.

Appendice B: dimensioni della lastrina

$$w = 3.9 \text{ mm}, \quad b = 2.3 \text{ mm}, \quad d = 1.2 \text{ mm}$$

References

- [1] Hall Effect Measurements SE-7260, Instruction Manual