

proporzionale alla componente del campo magnetico lungo l'asse z (3).

Anche se le dimensioni della sonda (cristallo + supporto meccanico -Y connessioni elettriche) non

NOTE DI LABORATORIO

a cura di GIULIO CALVELLI

(Per eventuali contributi indirizzare al
curatore - Dipartimento di Fisica
dell'Università- Via Marzolo 8 -
35100 Padova

Una versione semplice ed di gaussmetro digitale

1. Introduzione

Nel laboratorio didattico di fisica si presenta talvolta la necessità di misurare campi magnetici con una certa accuratezza.

Lo strumento attualmente più accurato e sensibile per la misura di campi magnetici è il magnetometro a SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) (1). Esso è tuttavia un dispositivo molto complesso e difficile da usare: basti pensare che la sonda dev'essere mantenuta alla temperatura dell'elio liquido (circa -269°C).

Un gaussmetro che consente una misura assoluta con precisione dell'ordine di qualche parte per milione può essere costruito sfruttando la risonanza magnetica nucleare (NMR). Questa tecnica tuttavia permette solo misure di campi magnetici estremamente uniformi sul volume occupato dalla sonda (tipicamente 1 cm) e non si presta quindi alla realizzazione di un gaussmetro economico da laboratorio (2).

Un altro metodo concettualmente semplice, e non molto costoso, che viene comunemente usato nei laboratori didattici è quello del flussometro a bobina mobile. Uno svantaggio di questa tecnica è che essa fornisce solo il valor medio del campo magnetico sull'area della bobina che è difficile rendere inferiore a qualche μT . Il risultato inoltre non è una misura assoluta (il flussometro va infatti tarato in un campo magnetico noto), ed infine il metodo è piuttosto laborioso e lento (ogni misura richiede una decina di minuti).

La realizzazione di un gaussmetro maneggevole, di facile uso, rapido, accurato e dotato di sonda di dimensioni ridotte è stata resa possibile solo dallo sviluppo della tecnologia dei circuiti integrati, e dalla comparsa sul mercato di sensori ad effetto Hall.

La sonda è un cristallo semiconduttore che, se percorso da una corrente costante I lungo l'asse x , produce una tensione V (Hall) lungo l'asse y

economica

sono generalmente inferiori a $5 \times 5 \times 2$ mm, il vero e proprio sensore (cristallo) è assai più piccolo (tipicamente $2 \times 2 \times 0.2$ mm), e pertanto il valore del campo magnetico è misurato localmente, e ciò consente ad esempio una facile esecuzione di mappe.

La misura è inoltre praticamente istantanea e si possono quindi costruire gaussmetri ad effetto Hall per campi magnetici alternati, con frequenze fino a qualche kHz.

L'accuratezza può essere spinta a qualche parte per mille senza troppe difficoltà, e le dimensioni complessive dello strumento possono essere molto contenute: ne esistono modelli tascabili con l'ingombro di un normale multimetro.

I gaussmetri commerciali ad effetto Hall sono, in conclusione, i dispositivi più pratici e flessibili per la misura di campi magnetici: loro difetto è il costo. Il prezzo medio infatti di un modello digitale tascabile, con precisione dell'1%, campo di misura fino a 20 kgauss e munito di una sonda, si aggira sui due milioni di lire, e con i dispositivi accessori di azzeramento e di taratura si superano i tre milioni (4).

Tuttavia per costruire «in casa» un gaussmetro con prestazioni prossime a quelle qui citate, la spesa necessaria può essere molto più contenuta: in questo lavoro descriviamo infatti un gaussmetro da noi realizzato il cui costo complessivo è inferiore alle 200.000 lire (valutato a fine 1985).

2. Descrizione dello strumento

Il dispositivo è schematizzato in figura I. Esso consiste essenzialmente di un regolatore di tensione (VR) che alimenta la sonda, di un voltmetro differenziale (DV) che legge la tensione di Hall, e di un visore a cristalli liquidi (LCD). In figura I è anche indicato un utile circuito accessorio: un segnalatore di «tensione insufficiente» (LOW BAT) che permette di provvedere in tempo alla sostituzione delle batterie prima che il dispositivo esca di taratura.

Lo schema dettagliato è riportato in figura 2. Il sensore adottato è un integrato facilmente reperibile e di costo contenuto (SPRAGUE UGN 214

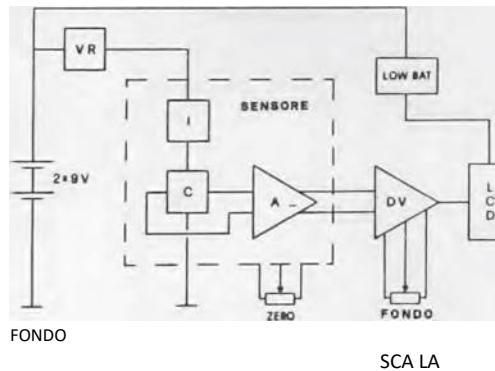


Fig. 1

3501 M) (8). Esso è fornito in versione a 8 piedini in supporto plastico di dimensioni 5 X IO X 2

mm. Lo schema funzionale del] integrato è riportato in figura 1: la tensione di alimentazione è applicata al piedino 3, e un generatore di corrente costante (I) alimenta il cristallo sensore (C). La tensione di Hall è preamplificata da un amplificatore (A) con uscita differenziale, e può essere azzerata tramite un potenziometro esterno (PO connesso ai piedini 5, 6 e 7). Il valore della resistenza totale di PO fissa il guadagno dell'amplificatore A e contemporaneamente l'ampiezza dell'intervallo di valori di campo magnetico entro cui la risposta è lineare. Diminuendo il guadagno si allarga tale intervallo.

Il voltmetro differenziale da noi usato è un «driver» per visore a cristalli liquidi (INTERSIL ICL 7106) adatto a pilotare un indicatore a tre cifre e mezza con segno (FAIRCHILD FLB 13X2). In questi due componenti sta il costo principale dello strumento.

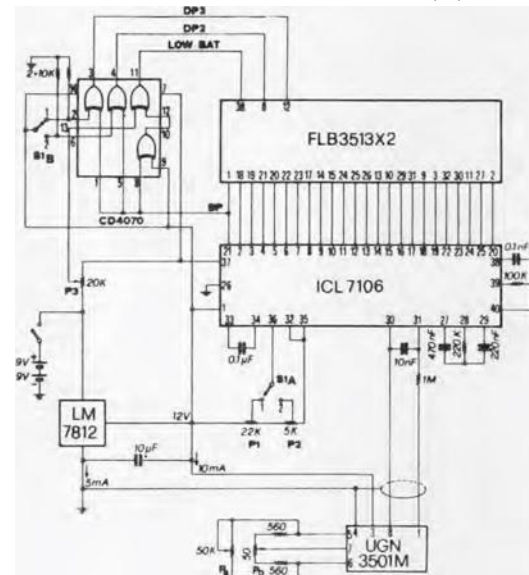


Fig. 2

NOTE DI LABORATORIO

Per garantire una buona stabilità alla tensione di alimentazione del sensore, necessaria per mantenere accurata la taratura del gaussmetro, si è impiegato un regolatore di tensione (NATIONAL LM 7812) selezionato per basso consumo, che mantiene l'uscita a 12V con un ingresso variabile tra 18 e 13V.

Nella versione più semplice la corrente erogata dalle batterie è di circa 17 nA, e ciò permette di operare con normali batterie a secco (2X9V) più di nove ore consecutive. Attivando l'opzione LOW BAT con l'aggiunta di un altro integrato (RCA CD 4070, «Quad Exclusive OR»), che accende l'indicatore sul visore quando la tensione delle batterie scende sotto la soglia di 13V (regolata attraverso il potenziometro P3), il consumo sale a circa 17.5 nA. Usando batterie alcaline il tempo di scarica supera le 24 ore.

Per la funzione LOW BAT sono utilizzate solo due delle quattro porte del CD 4070, e le altre due possono essere usate per selezionare il fondo scala del visore, accendendo il primo o il secondo punto decimale (2 kgauss 0 20 kgauss rispettivamente) mediante la sezione B del doppio deviatore SI. La sezione A di SI serve per selezionare la tensione di riferimento dell'ICL 7106 che fissa il guadagno del voltmetro differenziale (piedino 36), e quindi il valore che compare sul visore per una data tensione in uscita dal sensore.

Le dimensioni dell'UGN 3501M permettono di costruire una sonda trasversale sottile (spessore 1.5

mm) ed una sonda assiale di diametro abbastanza contenuto (1 mm) come illustrato in figura 3.

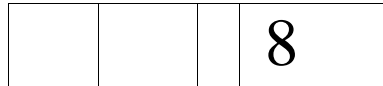
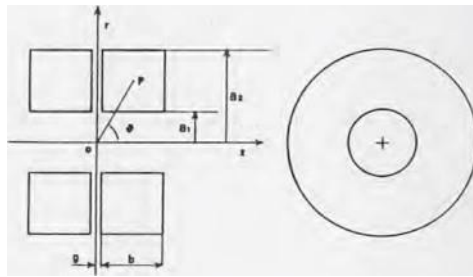


Fig. 3

NOTE DI LABORATORIO

Dato che la sensibilità della sonda dipende non solo dal valore scelto per PO ma anche dal particolare sensore usato (con PO I kohm, Vout 17 mV/gauss ± 25%), se si vuole evitare di ritarare lo strumento ogni volta che si cambia sonda, è opportuno corredare ogni sonda di un potenziometro PS (Ps PO) che verrà inserito in parallelo ed aggiustato così da correggere le differenze di sensibilità tra sensori diversi.

L'azzeramento va eseguito invece ogni volta prima di compiere la misura, in quanto esso consiste nel bilanciamento della tensione di offset che, non solo varia da sensore a sensore, ma che anche deriva con la temperatura e, più debolmente, nel tempo.

È importante che i terminali 5,6 e 7 siano schermati dal segnale in uscita, e che le connessioni siano più corte possibile, per evitare autooscillazioni. Una distanza di 5 cm di PO dal sensore sembra essere adeguata.

3. Taratura dello strumento

Per azzerare la tensione di Hall in assenza di campo magnetico la sonda va posizionata

ovviamente in una regione ove il campo sia, con buona approssimazione, nullo.

Il campo magnetico terrestre è molto debole (qualche decimo di gauss), ma la presenza di materiali ferromagnetici e di correnti continue può generare in laboratorio campi magnetici dispersi molto maggiori. È quindi opportuno disporre di una scatola di materiale ad alta permeabilità e bassa isteresi (Mumetal, Vacoperm, Supermalloy (5)) che agisca da schermo, ove inserire la sonda prima di procedere all'azzeramento, e dopo aver atteso un tempo sufficiente a portare a regime lo strumento (circa sette minuti dall'accensione).

La taratura poi può essere agevolmente eseguita aggiustando il guadagno dell'CL 7106 mediante i potenziometri PI e P2 per le rispettive scale, qualora si disponga di un campo magnetico noto.

Per produrre un campo di valore prefissato e uniforme su un'area di qualche mm², è sufficiente usare un alimentatore stabilizzato in corrente, un amperometro e una coppia di bobine come quelle descritte in figura 3, di cui si conosca il numero di spire N, la geometria (al, a2, b) e la separazione g.

Le bobine vanno connesse in serie, con avvolgimenti concordi, e posizionate sullo stesso asse con piccole separazione (g < b).

215

L'equazione che descrive il campo magnetico nel centro di simmetria del solenoide risultante è la seguente (6):

$$\frac{0,4 r N I B_z(0,0)}{\beta (\alpha - 1) a l} [f(\beta + \gamma) - f(\gamma)] \quad (1)$$

dove f è la funzione adimensionale

$$f(x) = x \ln \left[\frac{\alpha + (\alpha^2 + x^2)^{1/2}}{1 + (1 + x^2)^{1/2}} \right]$$

Nella (1) B è espresso in gauss, la corrente I in ampere, al in centimetri, e $\beta = b/al$, $\gamma = a2/al$ e $\alpha = g/al$.

Il valore di al determina le dimensioni del solenoide, mentre il valore desiderato per BZ(0,0) fissa il prodotto NI. Infine il numero delle spire N è determinato dal diametro del conduttore e dalla corrente che si vuol erogare.

Ad esempio per ottenere B = 500 gauss, con al = 1 cm, e con un filo di rame di diametro 0.5, si dovranno avvolgere 1300 spire per bobina (—25 ohm totali), ed erogare una corrente I = 901 mA (W—24 watt), avendo posto g = 1 mm, a2 = 32 mm, b = 19 mm.

Fig. 4

Naturalmente perché la relazione (1) sia verificata entro l'1% è necessaria una certa cura nella costruzione del solenoide: avvolgendo ordinatamente i successivi strati di spire su un supporto di alluminio lavorato al tornio, è possibile ottenere la necessaria precisione (decimo di millimetro) su a , b , g con un errore sulla determinazione di a^2 dell'ordine di 0.5 mm.

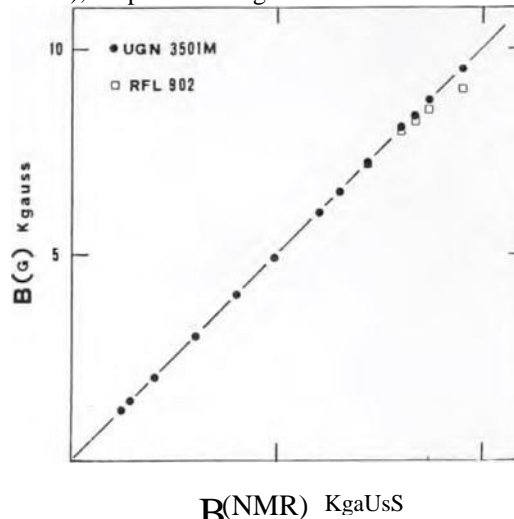
4. Prestazioni

L'accuratezza del gaussmetro è determinata essenzialmente dalla precisione della taratura. La sua stabilità nella lettura di fondo scala è infatti migliore dello durante il tempo di scarica delle batterie, la non-linearità è inferiore allo 0.5% fino a 10 kgauss e la deriva termica è per grado nell'intervallo 15°C 40°C.

Per confronto, il modello 902 della RFI (precisione nominale = 0.3%) ha una stabilità del 3% su scala 2 kgauss durante il tempo di scarica delle batterie, una deriva termina di per grado, e una non-linearità del 5% attorno a 10 kgauss (sonda TR 902). La taratura eseguita a 1000 gauss mediante il solenoide (1 1.802 A) è stata confrontata con quella assoluta eseguita da un apparato per risonanza magnetica nucleare (7).

Un grafico del campo $B(G)$ letto sul gaussmetro verso quello esatto B calcolato misurando la 216

frequenza di risonanza f_0 ($B = f_0/4.2577$ gauss/MHz), è riportato in figura 4.



Lo strumento qui descritto usa il sensore che ci è sembrato migliore tra tutti quelli da noi provati, tenendo conto di costo, reperibilità, stabilità termica, campo di misura, sensibilità etc. Altri sensori (Honeywell 9 ISSI 2, Siemens SAS231W, Sprague UGN3501T) si prestano comunque alla realizzazione di gaussmetri economici, anche se meno precisi.

La parte più delicata è, a nostro avviso, la costruzione dello «standard» di campo magnetico (solenoido) che, se eseguita con cura, può sostituire la scomoda e costosa taratura con NMR o verso un gaussmetro campione.

NOTE DI LABORATORIO

BIBLIOGRAFIA

- (1) A. W.B. Taylor «Superconductivity», The Wykeham Publ. London, 1970.
- (2) A.C. Lekussubis «Experiments in modern physics», Academic Press, N. Y. , 1966.
- (3) J.P. McKelvey «Solid state and semiconductor physics», Harper Int. ed., N.Y. , 1967.
- (4) Ad esempio: R FL Industries, Powerville Rd, Boston, N.J., U.S.A.; Walker Scientific Inc., Rockdale St, Worchester, MA, U.S.A.; Magnet Physik, Friedrik Karl Str, Colonia, RFT.
- (5) Le leghe «mumetal», «vacoperm» etc. sono prodotte ad esempio dalla Vacuumschmelze, Hanau, RFT (importatore: SISRAM, v. Matteotti, Torino).
- (6) H. Brechna in «Methods in experimental physics», L Marton ed., Academic Press, N.Y. , 1969.
- (7) Modello A675, ALPHA SCIENTIFIC LAB, 940 Dwight Way, Berkeley, U.S.A.
- (8) Questo sensore è reperibile presso i rivenditori Sprague o direttamente dalla Sprague Italiana, via G. De Castro 4, Milano.

INDICE DELLE FIGURE

- Fig. 1 Schema a blocchi del gaussmetro.
- Fig. 2 Schema dettagliato del circuito predisposto per due scale: 2 e 20 kgauss.
- Fig. 3 Geometria del solenoide di taratura e sonde.
- Fig. 4 Il campo magnetico letto con il gaussmetro $B(G)$ verso il campo noto $B(NMR)$.