
ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI
RENDICONTI

CARLO LUPONIO, FLAVIO PORRECA

**Onde magnetostrittive prodotte da impulsi magnetici
nei ferromagnetici policristallini**

*Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche,
Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 60 (1976), n.4, p. 433–441.*
Accademia Nazionale dei Lincei

<http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1976_8_60_4_433_0>

L'utilizzo e la stampa di questo documento digitale è consentito liberamente per motivi di ricerca e studio. Non è consentito l'utilizzo dello stesso per motivi commerciali. Tutte le copie di questo documento devono riportare questo avvertimento.

*Articolo digitalizzato nel quadro del programma
bdim (Biblioteca Digitale Italiana di Matematica)
SIMAI & UMI*

<http://www.bdim.eu/>

SEZIONE II

(Fisica, chimica, geologia, paleontologia e mineralogia)

Fisica. — *Onde magnetostrittive prodotte da impulsi magnetici nei ferromagnetici policristallini.* Nota di CARLO LUPONIO e FLAVIO PORRECA, presentata (*) dal Socio A. CARRELLI.

SUMMARY. — By applying magnetic pulses to the ferromagnetic polycrystalline rods we can generate ultrasonic vibrations travelling through the sample as magnetoelastic standing waves propagating in the extensional mode. The work points out either to the measurement of the "stress sensitivity" as a function of the magnetizing field or to the Q-factor as a function of the frequency. Excellent agreement between theory and experiment is obtained. Moreover we observe a first result interesting for applications. Indeed interferential phenomena are obtained as an effect of excitation pulsewidth.

INTRODUZIONE

È ben noto che nei materiali piezoelettrici possono essere generate vibrazioni ultrasonore convertendo energia elettrica in energia meccanica (elastica), così come nei materiali ferromagnetici può aver luogo eccitazione fononica se energia magnetica è convertita in energia elastica per effetto magnetostrittivo.

In quest'ultimo caso, a livello atomico, a causa dell'interazione spin-orbita, le variazioni di momento magnetico di spin producono variazioni di momento orbitale che, a loro volta, a causa dell'interazione orbita-reticolo cristallino, producono sollecitazioni reticolari. Macroscopicamente, per l'azione cooperativa dei momenti magnetici di spin (che nel materiale smagnetizzato si orientano isotropicamente nelle direzioni di facile magnetizzazione), si verifica una rotazione del vettore di induzione magnetica dipendente dal valore della permeabilità relativa al particolare processo studiato. Di conseguenza, per effetto del citato meccanismo di interazioni, ha luogo una deformazione macroscopica, dipendente dal coefficiente λ di magnetostrizione, la quale si propaga attraverso il materiale quale onda elastica.

Con il dispositivo sperimentale da noi usato si è in grado di generare, mediante l'applicazione di campi magnetici variabili nel tempo, fononi di frequenza compresa tra 10 e 100 kHz, in campioni ferromagnetici di forma allungata di diametro non superiore a 10 mm e di 250 mm di massima lunghezza. Entro tali limiti è quindi possibile un'indagine su grandezze fisiche che caratterizzino il comportamento magnetico del materiale da una parte [1] e quello elastico dall'altra [2], nonché su grandezze che caratterizzino l'interazione magnetoelastica, sia che essa avvenga nel verso magnetizzazione \rightarrow elasticità in fase di eccitazione fononica [3] che nel verso elasticità \rightarrow magnetizzazione in fase di rivelazione [4].

(*) Nella seduta del 10 aprile 1976.

APPARECCHIATURA E RISULTATI SPERIMENTALI

Le ricerche sono state condotte su sbarrette di Fe e di Ni di 4 mm di spessore, a basso tenore noto di impurezze, ricotte e rincrudite sempre nelle medesime condizioni in modo da ridurre al minimo lo stato iniziale di magnetizzazione e gli sforzi interni. L'eccitazione è costituita da impulsi rettangolari ΔH di campo magnetico di intensità variabile, di circa 100 nsec di tempo di salita (esponenziale), la cui durata si possa considerare praticamente infinita per i processi in esame. Per questo studio si è montata l'apparecchiatura riprodotta in fig. 1 che descriviamo nei suoi componenti essenziali.

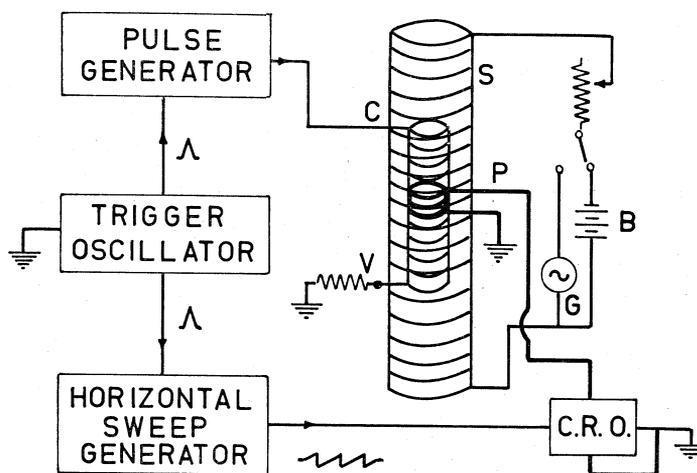


Fig. 1.

Una bobina C a basso valore induttivo è alimentata da un generatore di impulsi di corrente di 200 mA di picco, in modo da fornire impulsi ΔH di campo magnetico di ampiezza non superiore ai 4 Oe. I campioni cilindrici sono sospesi liberamente in posizione verticale nella bobina C. Una sonda P, costituita da 300 spire schermate avvolte su C, provvede, mediante un'oscilloscopio rapido C.R.O. (1 nsec di tempo di salita), alla rivelazione della forza e.m. indotta in essa dalle variazioni del flusso di induzione della sostanza ferro-magnetica esaminata. Il «trigger oscillator» sincronizza lo «start» degli impulsi di eccitazione con lo «start» del segnale a dente di sega dello «Horizontal sweep generator» che fornisce la base lineare dei tempi. L'apparecchiatura si completa con un lungo solenoide S alimentato in c.c. da B o in c.a. da G per magnetizzare o smagnetizzare il campione.

La risposta che la teoria delle eddy-currents prevede [5] nel caso di magnetizzazione impulsiva dei campioni cilindrici è una variazione di flusso di induzione che dal primo strato superficiale si propaga radialmente verso l'interno del campione seguendo una legge esponenziale. Tale fenomeno è

anche noto come « viscosità magnetica ». La costante di tempo $\tau = \mu\sigma r_0^2$, che dipende da parametri fisici e geometrici del materiale ($r_0 =$ raggio della sbarretta; $\mu =$ permeabilità dinamica; $\sigma =$ conducibilità elettrica), si può assumere come misura del ritardo di magnetizzazione nella direzione radiale.

La teoria porta alla determinazione di una funzione $\Phi(r, t)$ flusso di induzione in un istante t e attraverso una sezione πr^2 ($r =$ distanza dall'asse del campione). La grandezza misurabile è invece $\Phi(r_0, t)$, cioè il flusso di induzione attraverso l'intera sezione πr_0^2 ; essa è quindi solo funzione del tempo.

L'espressione analitica di $\Phi(\xi)$ è la seguente:

$$\Phi(\xi) = 4 \Phi(0) \sum_1^{\infty} \frac{\exp(-\lambda_n^2 \xi)}{\lambda_n^2}$$

essendo $\xi = \frac{t}{4 \pi \mu \sigma r_0^2}$ e λ_n la radice n -esima dell'equazione di Bessel di ordine zero.

Si sono in precedenza analizzate le nostre risposte sperimentali [6] confrontando i dati con la funzione $\Phi(\xi)$. Si è inoltre osservato [7] che il metodo è quanto mai valido per studiare il comportamento magnetico del campione in vari stati di magnetizzazione caratterizzati da un determinato μ , in tutti i casi in cui l'eccitazione è un transiente rapido di ampiezza abbastanza piccola.

In aggiunta a questi risultati si sono poste inequivocabilmente in evidenza [8] variazioni periodiche del flusso di induzione, che si sovrappongono alla aperiodica variazione esponenziale prevista dalla teoria, per dar luogo ad una traccia oscillografica più complessa.

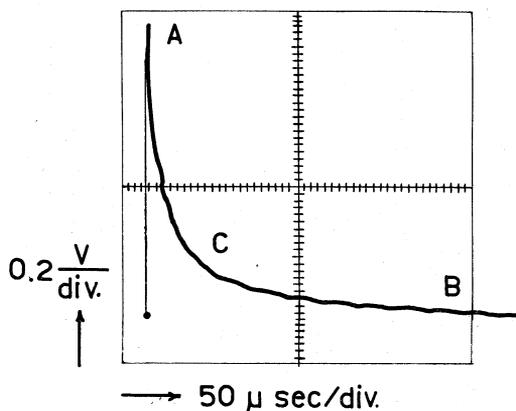


Fig. 2.

La fig. 2 mostra la tipica risposta al gradino magnetizzante per una sbarretta di Ni. La caduta esponenziale AB dovuta alle eddy-currents è « modulata » da periodiche variazioni di flusso visibili nel tratto CB. In fig. 3 lo stesso segnale è amplificato 4 volte verticalmente, mentre in fig. 4 l'ampli-

ficazione verticale è 40 volte maggiore e la sensibilità della scala dei tempi è 10 volte minore. Quest'ultima condizione sperimentale è la più opportuna per lo studio delle oscillazioni di flusso da noi individuate.

Tali oscillazioni di magnetizzazione sono necessariamente effetto di un'onda elastica stazionaria che si propaga nel campione nel modo estensionale.

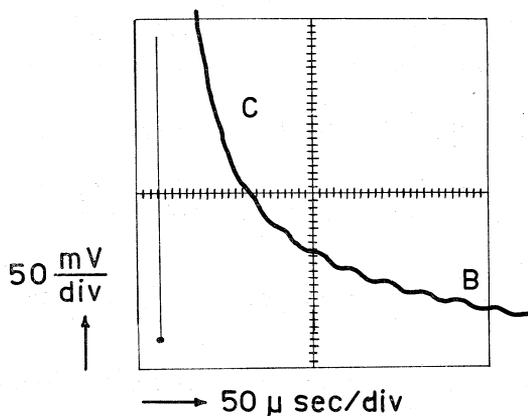


Fig. 3.

Infatti in una recente pubblicazione [8] si è mostrato che le vibrazioni sono generate per effetto Joule magnetostrittivo e sono rivelate per effetto Villari [9]. Inoltre in essa si è descritta una tecnica sperimentale che consente di produrre interferenza tra coppie di treni di vibrazioni generati da ogni fronte di salita e di discesa degli impulsi rettangolari di eccitazione. Se la durata

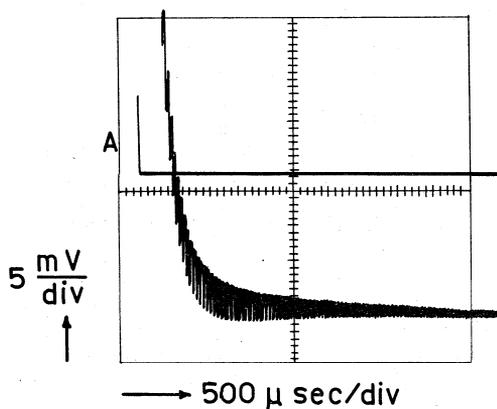


Fig. 4.

di questi ultimi si fa variare entro opportuni limiti, si ottengono fononi di qualsivoglia ampiezza compresa tra zero e un valore pari alla somma delle ampiezze dei fononi interessati alla interferenza. La fig. 5 mostra tre oscillogrammi che illustrano tale risultato sperimentale.

I segnali di tensione A di durata variabile misurati nel punto V di fig. 1, agli estremi di una R antiinduttiva, sono proporzionali agli impulsi di corrente Δi e rappresentano gli impulsi rettangolari ΔH di campo magnetico. I segnali B sono identici ad A ma riportati in una scala di tempi 50 volte meno sensibile e identica alla scala dei tempi dei segnali C. Questi ultimi rappre-

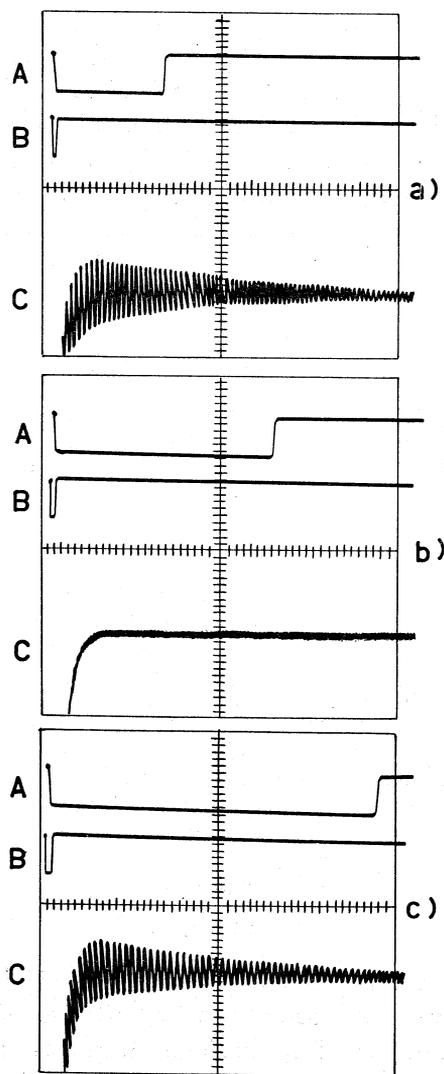


Fig. 5.

sentano la risposta magnetostrittiva sincronizzata con l'eccitazione. Per tre diverse durate dei segnali A, che differiscono tra loro di una quantità pari a mezzo periodo della vibrazione ultrasonora propagantesi nel provino, si osservano le tre risposte C mostrate in a), b) e c). Si è verificato che la condizione generale di massimo e di minimo di interferenza si ha per $\tau = (2k + 1) \cdot T/2$ e

per $\tau = 2 k \cdot T/2$ rispettivamente, essendo T il periodo della vibrazione e τ la durata dall'impulso magnetico.

Nel presente lavoro, utilizzando gradini ΔH di campo magnetico (e non impulsi rettangolari) si sono studiati altri due problemi.

Nel primo si studia la dipendenza della «sensibilità allo stress» [10] da un campo polarizzante esterno fino a 1200 Oe, misurata dall'ampiezza delle vibrazioni in un prefissato istante rispetto all'istante zero di accensione del campo. I campioni sono sbarrette policristalline di Fe e di Ni di uguali dimensioni, ricotte al di sopra del punto di Curie e raffreddate lentamente per ridurre al minimo gli sforzi interni e lo stato iniziale di magnetizzazione. I punti sperimentali ottenuti sono riportati in fig. 6. In fig. 7 la stessa grandezza è stata misurata, per una sbarretta di Ni, in funzione dell'ampiezza ΔH del gradino magnetico assumendo come parametro il campo esterno magnetizzante H .

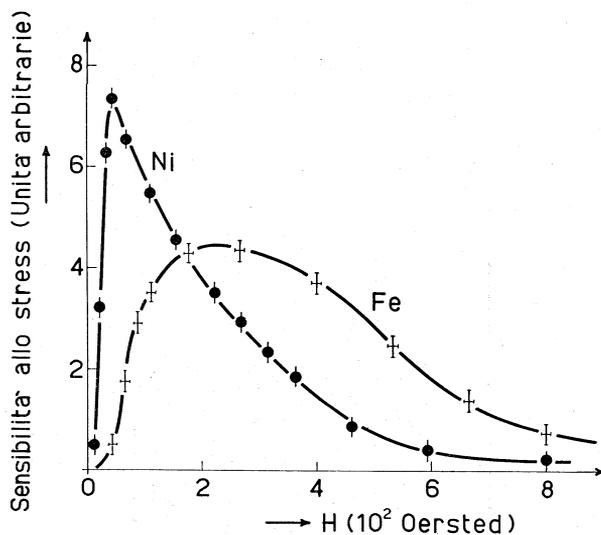


Fig. 6.

Il secondo problema è quello del meccanismo di dissipazione di energia. A tal fine si è misurato il decremento logaritmico $\delta = \ln(A_t/A_{t+T})$ delle vibrazioni (A_t = ampiezza di oscillazione all'istante t ; A_{t+T} = ampiezza di oscillazione dopo il periodo T) per due serie di campioni di Fe e di Ni al variare della lunghezza l , e quindi della frequenza stazionaria di vibrazione f . Per il Ni i valori di δ in funzione di l seguono l'andamento della fig. 8 presentando un massimo di $21 \cdot 10^{-3}$ (fattore di merito $Q = 150$), quest'ultimo ottenendosi per un campione di 107 mm di lunghezza corrispondente ad una frequenza di 24.50 kHz. Analoga dipendenza dalla lunghezza si osserva per campioni di Fe; in tal caso, tuttavia, il fattore di merito Q è sempre maggiore raggiungendo il massimo valore di 10^{-1} .

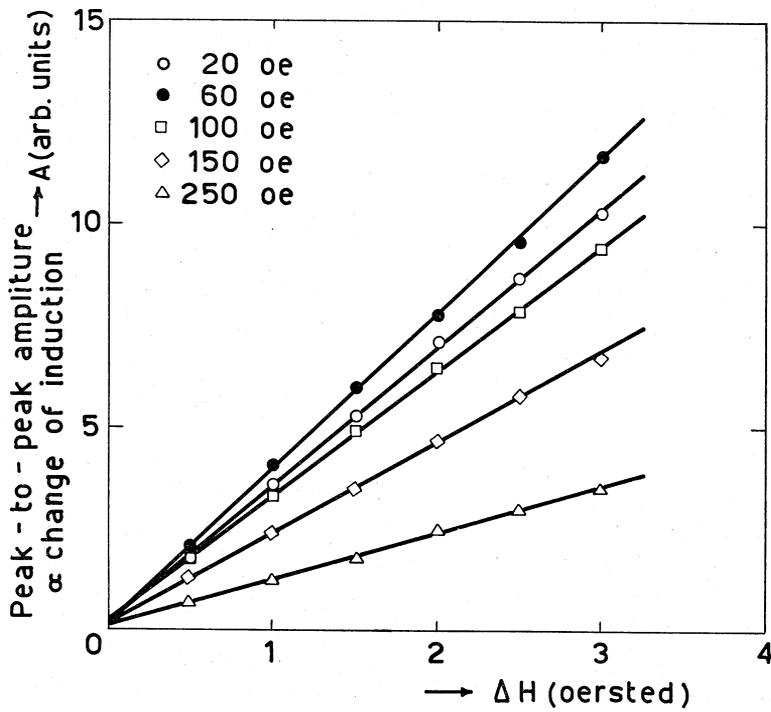


Fig. 7.

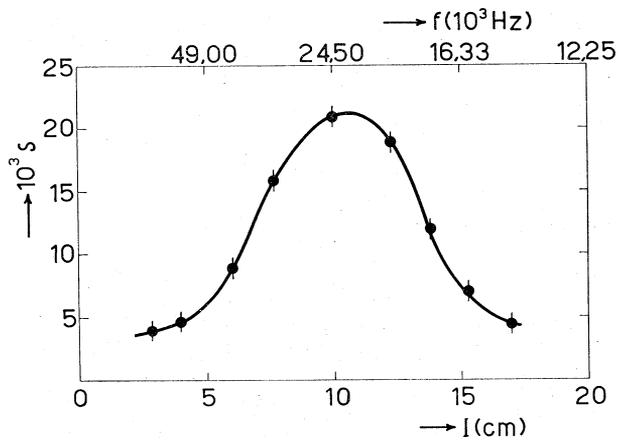


Fig. 8.

INTERPRETAZIONI CONCLUSIVE

I risultati ottenuti possono essere sintetizzati e interpretati come segue.

1. La magnetostrizione diretta (effetto Joule) è responsabile della deformazione, la quale dà luogo a propagazione fononica, che il campione subisce in seguito alla variazione impulsiva di magnetizzazione. La magnetostrizione

inversa (effetto Villari), innescata dall'onda ultrasonora, è invece responsabile della variazione di induzione che permette la rivelazione del fonone. Di origine profondamente diversa è invece la variazione di induzione aperiodica che rende conto del cosiddetto fenomeno di viscosità magnetica, come abbiamo illustrato in [6] e [7].

2. L'ampiezza delle vibrazioni magnetostrittive, ottenuta in funzione del campo magnetizzante il campione, è una misura della « sensibilità allo stress ». Queste misure mostrano (fig. 6) che la massima « sensibilità » si ottiene per opportuni valori della polarizzazione statica (45 Oe Ni; 240 Oe Fe) e che tali valori non coincidono con quelli corrispondenti al massimo valore della permeabilità « dinamica ». Viceversa l'effetto è praticamente trascurabile se il campo esterno è nullo o è piuttosto elevato (800 Oe Ni; 1200 Oe Fe). Si nota che il valore di tale campo è maggiore per il Fe che per il Ni in relazione al fatto che la magnetizzazione di saturazione del Fe si raggiunge per campi più elevati. Quindi per tali valori statici la risposta è costituita dalla sola caduta esponenziale della variazione di magnetizzazione. Questo risultato, ossia l'annullamento della vibrazione magnetostrittiva, può essere conseguito con un metodo alternativo e in particolare senza ricorrere al campo magnetizzante di saturazione. Tale metodo, come è stato da noi evidenziato sperimentalmente [8], sfrutta l'azione di impulsi rettangolari magnetici di opportuna durata. Un vantaggio di tale metodo consiste nel fatto che l'intensità degli impulsi magnetici, necessaria per lo spegnimento delle vibrazioni, è molto piccola (1-4 Oe) rispetto al valore del campo magnetizzante di saturazione (10^3 Oe circa) necessario per ottenere lo stesso risultato ⁽¹⁾.

3. I risultati riportati in fig. 7 provano che l'ampiezza di vibrazione A è una funzione lineare di ΔH ; ciò è in ottimo accordo con una teoria termodinamica dei domini [10], che riguarda l'effetto della variazione di induzione dovuta ai piccoli stress [11].

4. Infine l'analisi dello smorzamento fornisce per il Ni un fattore di merito Q non superiore a 630 e ciò in buon accordo con dati bibliografici che riguardano esperienze di riflessione di treni d'onda ultrasonori [12]. Dalla dipendenza di δ da τ si ricava una caratteristica lunghezza (~ 107 mm per il Ni) cui è associata una caratteristica frequenza stazionaria ($\sim 24,50$ kHz) per la quale lo smorzamento è massimo (minimo fattore di merito). Ciò prova che, unitamente alla dissipazione di energia originata dalle eddy-currents (macroscopiche), compare anche una dissipazione di origine magnetoelastica [13]. Da nostri esperimenti risulta ancora che per campi magnetizzanti uniformi fatti variare tra 0 e 1000 Oe il fattore di merito Q resta costante.

(1) Si suggerisce tale tecnica in vista di possibili applicazioni, come l'attenuazione del rumore di fondo dovuto a segnali magnetostrittivi indesiderati, anche se sono presenti campi esterni che incrementano, in generale, la « sensibilità » allo stress.

Queste prove portano a concludere che la dissipazione causata da microscopiche eddy-currents e da salti di Baekhausen è quanto meno trascurabile nell'effetto in istudio.

La semplicità dei mezzi sperimentali usati e l'accordo di molti risultati con i dati bibliografici ci spinge ad orientare il futuro della ricerca verso lo studio di materiali ferromagnetici anche di nuova fabbricazione (ossidi esagonali, materiali amorfi) e di recente interesse, il cui comportamento magnetoelastico non è del tutto conosciuto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. OLSEN (1966) - *Applied Magnetism* (Phil. Techn. Libr.), 113.
- [2] RAM KUMAR (1967) - « Proc. Vibr. Probl. », 3, 8.
- [3] G. GORODETSKY, B. LÜTHI, T. G. MORAN e M. E. MULLEN (1972) - « J. Appl. Phys. », 43, 1234.
- [4] H. Z. FRANZ (1962) - « Metallk », 53, 27.
- [5] R. M. BOZORTH (1968) - *Ferromagnetism* (Van Nostrand, Princeton, New Jersey), 769-810.
- [6] A. CARRELLI, C. LUPONIO e F. PORRECA (1972) - « Rend. Acc. Sc. Fis. Matem. », 29, 3.
- [7] A. CARRELLI, C. LUPONIO e F. PORRECA (1973) - « Rend. Acc. Sc. Fis. Matem. », 40, 44.
- [8] C. LUPONIO e F. PORRECA (1976) - « J. Appl. Phys. » 47, 727.
- [9] E. G. RICHARDSON (1957) - *Technical Aspect of Sound*. Vol. II (Elsevier Company, Amsterdam), 75-79.
- [10] R. M. BOZORTH - Ref. 5, 613-619.
- [11] C. LUPONIO e F. PORRECA (1975) - « Boll. S.I.F. », 106, 100.
- [12] R. M. BOZORTH, W. P. MASON, H. J. MCSKIMIN e J. G. WALKER (1949) - « Phys. Rev. », 12, 1954.
- [13] C. ZENER, W. OTIS e R. NUCKOLLS (1938) - « Phys. Rev. », 53, 100.