

NO 2	AÑO 1968
---------	-------------

NO SE PRESTA

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

EFFECTO MAGNETOMORFICO LONGITUDINAL
EN LAMINAS DE IN

por

F. de la Cruz, M. E. de la Cruz y J. M. Cotignola

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

EFFECTO MAGNETOMORFICO LONGITUDINAL
EN LAMINAS DE IN

por

F. de la Cruz, M. E. de la Cruz y J. M. Cotignola

BUENOS AIRES

1968

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

EFFECTO MAGNETOMORFICO LONGITUDINAL EN LAMINAS DE IN. *

F. de la Cruz, M. E. de la Cruz, J. M. Cotignola ⁽¹⁾

RESUMEN

Se realizaron mediciones de efecto magnetomórfico en láminas de indio de espesor entre 0,003 cm y 0,01 cm. Los resultados fueron comparados con cálculos teóricos basados en el modelo del electrón libre. Para esto fue necesario descontar la magnetorresistencia intrínseca, haciendo uso de la regla de Kohler modificada por Olsen. De la comparación de los datos experimentales con la teoría, se dedujeron los valores del impulso electrónico y el valor del producto de la resistencia intrínseca por el camino libre medio, $\rho b \ell$. También fueron analizados datos obtenidos por Olsen en alambres, usando nuestra función de Kohler y un criterio diferente para comparar con la teoría del utilizado por este autor. El valor de $\rho b \ell$, obtenido se discute según un análisis hecho por Bate et. al., basado en la anisotropía del camino libre medio.

* Este trabajo fue realizado bajo los auspicios del C.N.I.C.T. (Republica Argentina) Subsidio 2491/66 y de la N.S.F. (E.E.UU) Subsidio NSF-GP 3586.

(1) División Bajas Temperaturas - Centro Atómico Bariloche (C.N.E.A.)
Instituto de Física "Dr. J. A. Balseiro" - (U.N.C. - C.N.E.A.)

INTRODUCCION

Los procesos de dispersión de los electrones por los contornos de la muestra, se ponen de manifiesto a través de mediciones de resistencia eléctrica en función del tamaño de la misma. Este fenómeno es observable cuando el camino libre medio de los electrones es del orden del tamaño de la muestra. Experimentalmente las geometrías más usuales son láminas y alambres. Para estos casos existen cálculos teóricos 1,2) hechos por Fuchs y Dingle, respectivamente. Estos autores basan la teoría en el modelo del electrón libre, resolviendo la ecuación de Boltzmann con las condiciones de contorno adecuadas y suponiendo un tiempo de relajación único e isotrópico. De la comparación entre datos experimentales y teoría es posible, en principio, determinar el valor de la resistividad intrínseca de la muestra, ρ_b , y el camino libre medio intrínseco ℓ . Para que esto sea válido es necesario suponer que ambos son los mismos para todas las muestras. Esta condición es muy difícil de lograr experimentalmente, puesto que las diversas muestras, aún provenientes del mismo origen, pueden resultar diferentemente contaminadas durante el proceso de preparación.

De acuerdo a cálculos teóricos, un método más poderoso es la medición de la resistividad eléctrica de muestras delgadas en presencia de campo magnético. Debido a las distintas posibilidades de geometría y orientaciones de campo, hay muchos efectos posibles. Nosotros nos ocuparemos del caso de láminas delgadas con el campo magnético longitudinal. Este caso ha sido resuelto teóricamente por Yi-Han Kao 3) usando el modelo del electrón libre y el método cinético desarrollado por Chambers 4).

Para el caso de alambres 4), la teoría predice un decrecimiento monótono de la magnetorresistencia longitudinal a medida que aumenta el campo. En láminas delgadas aparece un máximo en la zona de campos bajos.

Una importante ventaja de comparar mediciones de magnetorresistencia con la teoría es que esta última permite obtener ρ_b y el impulso electrónico mv , en forma independiente y a partir de una sola muestra.

Mediciones magnetoacústicas hechas en In 5), indican que el modelo del electrón libre es capaz de describir bastante bien la superficie de Fermi de este metal. Sin embargo, mediciones de efecto magnetomórfico longitudinal en alambres delgados 6), no mostraron un acuerdo razonable con la teoría, pese a que en aluminio 7), que tiene una superficie de Fermi similar, el acuerdo fue muy bueno.

Metales con superficie de Fermi no esférica, muestran magnetorresistencia

intrínseca. Para poder comparar los resultados con la teoría, este efecto debe ser descontado. La magnetorresistencia total resulta de la superposición de ambos efectos y no es posible separarlos en forma inmediata. La única forma disponible hasta el momento para hacerlo, se basa en una modificación de la regla de Kohler sugerida por Olsen 6).

Hemos realizado mediciones en láminas de distinto espesor para ver si es posible definir un ℓ , ρ_b y mv , en forma tal de hacer coincidir las curvas teóricas con las experimentales.

DETALLES EXPERIMENTALES

Construcción de las muestras

Las mediciones de la magnetorresistencia intrínseca se hicieron en las muestras In_1 8), In_2 , In_3 , In_4 . El material de las tres últimas era de pureza inferior y de origen desconocido.

Las muestras se llevaron al espesor deseado colocando el material entre dos planchas de teflón y pasando el "sandwich" por la laminadora. Los alambres de corriente eran de indio y fueron soldados directamente en los extremos de la muestra, sin utilizar ningún tipo de soldadura 9). El objeto de usar alambres de corriente del mismo material que las muestras fue el de evitar la aparición de efectos termoelectricos indeseables.

Los alambres de tensión fueron de manganina de 0,002" de diámetro y fijados en las tres primeras muestras a 3 cm de distancia entre sí, en puntos lo más alineados posible con el eje de las mismas.

La separación de estos alambres de los de corriente, fue de aproximadamente 0,5 cm.

Para verificar que la separación entre alambres no influía las mediciones en la muestra In_3 se colocaron dos alambres de tensión más, separados entre si por una distancia de 1,5 cm; los resultados obtenidos en estas condiciones son los denominados In_4 .

Los alambres de tensión fueron fijados a la muestra mediante soldadura de punto. Para ello se aplanó ligeramente la manganina en la zona que se deseaba soldar. La soldadura lograda fue de buena calidad, firme y localizada dentro de un área de aproximadamente 0,1 mm de diámetro.

Las muestras se fijaron a un soporte de indio previamente envuelto en mylar de 0,0075" de espesor, para lograr aislación eléctrica entre muestras y soporte. El mylar fue pegado al soporte con barniz G.E. 7031. Se utilizó el mismo material para hacer el soporte y las muestras, para evitar dañar estas últimas por efectos de diferencia de dilatación. Una vez que las muestras estuvieron fijadas al montaje fueron recocidas a 50° C durante 24 horas.

Para medir el efecto magnetomórfico se prepararon muestras delgadas con material del mismo origen que In_1 . La técnica de preparación y montaje fue idéntica a la descripta anteriormente.

Cuando las muestras estaban a 4°K, las f.e.m. espurias eran del orden de algunos microvoltios. Para evitar este efecto se cortaron los alambres de manganina a algunos centímetros de las soldaduras y se continuaron con cobre hasta temperatura ambiente, cuidando que parte del cobre estuviera siempre sumergido en el baño de helio. De esta forma fue posible reducir las f.e.m. espurias en un factor 10.

Método de Medición

Las mediciones de resistencia se hicieron circulando una corriente por la muestra y midiendo la caída de tensión.

La corriente se midió con un amperímetro Weston Instruments Model 931, 3 Amp fondo de escala, y la tensión con un milimicrovoltímetro Keithley Model 149, con una sensibilidad de hasta 0,1 microvoltio fondo de escala.

La corriente se varió para asegurarse que no había calentamiento de las muestras por efecto Joule.

La alineación de campo y corriente se determinó buscando el mínimo de resistencia con respecto a la orientación de campo.

Se utilizaron campos de hasta 14 kOe, homogéneos en un 1% dentro del espacio ocupado por la muestra. Las mediciones de campo se efectuaron utilizando un gaussímetro de bobina rotante. El factor geométrico de las muestras se determinó midiendo la resistencia de las mismas a temperatura ambiente y tomando $\rho_{293} = 9,1 \times 10^{-6}$ Ohm-cm.

RESULTADOS Y DISCUSION

Magnetorresistencia intrínseca

Los resultados de estas mediciones se utilizaron para determinar la función de Kohler

$$\rho_H = \rho \left[1 + F\left(\frac{H}{\rho}\right) \right]$$

En esta expresión ρ_H es la resistividad medida en presencia del campo magnético H ; ρ es la resistividad para $H=0$ y F es la función de Kohler que depende únicamente del metal.

La figura 1 muestra la función de Kohler obtenida y el buen acuerdo entre las diferentes muestras, pese al diferente grado de pureza entre las mismas.

Las mediciones se realizaron a 4°K en muestras suficientemente grandes como para que el efecto de tamaño sea despreciable. A esta temperatura las muestras In_2 , In_3 , In_4 , estaban en la zona de resistencia residual. In_1 no estaba aún en dicha zona y su resistencia a 1,5°K no pudo ser determinada con suficiente precisión debido a que el ruido proveniente del electroimán afectaba las mediciones.

Dado que los resultados son independientes de la pureza, es razonable suponer que la regla de Kohler es la misma, a más bajas temperaturas, en las muestras más puras.

Nuestros resultados no coinciden con los previamente obtenidos por Olsen 6).

Para comprobar que nuestros resultados no dependen del tipo de soldadura empleado, se determinó la regla de Kohler usando una muestra en la que se substituyeron los alambres de manganina por alambres de indio; estos fueron fijados a la muestra presionándolos en frío contra la misma. La fijación en este caso no resultó tan resistente ni tan localizada como con el otro método. La regla de Kohler así determinada coincidió con la obtenida por nosotros anteriormente.

Para verificar la calidad de nuestras mediciones se midió la magnetorresistencia del aluminio en una muestra similar a las utilizadas y con método idéntico. Los resultados obtenidos estuvieron en buen acuerdo con los de otros autores 7).

Efecto magnetomórfico

El efecto de tamaño se midió a 4,2°K y 1,5°K, en seis muestras hechas con el mismo material que In₁

El efecto magnetorresistivo intrínseco se descontó utilizando la regla de Kohler modificada por Olsen

$$\rho_H = \rho'_H \left[1 + F \left(\frac{H}{\rho'_H} \right) \right]$$

donde ρ_H es la resistividad medida; ρ'_H se considera que es la resistividad en campo H que se mediría si no hubiera magnetorresistencia intrínseca y F es la función de Kohler obtenida a partir de la figura 1.

No fue posible encontrar un acuerdo razonable entre la teoría y los resultados a 4,2°K. Esto puede deberse a que las muestras no se encontraban en la zona residual y por lo tanto la dispersión de electrones debida a fonones es todavía importante.

Si bien a 1,5°K, ρ'_H muestra un máximo tal como lo predice la teoría, no fue posible hacer coincidir las curvas teóricas y experimentales en esta zona sin obtener un mal acuerdo en el resto de la curva.

Es posible sin embargo encontrar un acuerdo razonable en todo el rango, a expensas de una coincidencia más pobre en la zona del máximo. Este fue el criterio usado para comparar los resultados y tal comparación se muestra en la figura 2.

En realidad en las dos muestras más gruesas, In₅, In₁₀, el máximo no fue observado. Esto es seguramente debido a que por ser ℓ y el espesor de las muestras, a , grandes el máximo se encontraba en la zona de campo en que el material es superconductor.

Los valores de ρ_b , ℓ y mv deducidos a partir de la comparación con la teoría, se ven en la tabla I.

La sensibilidad del método para determinar mv es de un 7% y la variación de los valores obtenidos con cada muestra está dentro de este orden. El valor promedio para el impulso es 1,5 gr.cm/sec.

El acuerdo de las curvas teoricas y experimentales es mejor que el obtenido por Olsen 6). Sin embargo este autor utiliza una regla de Kohler y un cri-

terio para hacer la comparación, diferentes de los utilizados por nosotros. Olsen supone que ℓ es el mismo para todas las muestras provenientes de un mismo origen.

Los datos de Olsen a 2°K fueron usados conjuntamente con nuestra regla de Kohler para deducir los valores de ρ_b , ℓ y mv, haciendo uso de las curvas teóricas dadas por Chambers. Los valores deducidos son los dados en la tabla II. En la figura 3 puede verse la comparación de los resultados experimentales con la teoría. Los valores de mv así obtenidos están en buen acuerdo con nuestras mediciones en láminas delgadas.

De los datos de tabla II resulta para $\rho_b \ell$ un valor medio igual a $1,3 \times 10^{-11}$ ohm cm. Este es algo inferior al valor $1,8 \times 10^{-11}$ ohm cm obtenido por Olsen a partir de los mismos datos.

Representando en un gráfico ρ_o (resistividad a campo nulo) en función de $1/d$, donde d es el diámetro del alambre, este autor obtiene una recta y haciendo uso de la regla de Nordheim

$$\rho_o = \rho_b + \frac{\rho_b \ell}{d}$$

calcula ρ_b y $\rho_b \ell$.

Los valores de ρ_b calculados a partir de las mediciones en láminas delgadas definen una recta en función de $1/a$, como puede verse en la figura 4; de esta forma es posible escribir

$$\rho_b = \rho'_b + \frac{\alpha}{a}$$

Esta variación de ρ_b con el espesor puede deberse a que la concentración de impurezas, como consecuencia del proceso de preparación, es tanto mayor cuanto más delgadas sean las muestras.

Si esto fuese válido para los datos de Olsen, entonces la regla de Nordheim debería escribirse

$$\rho_o = \rho'_b + \frac{\alpha + \rho_b \ell}{d}$$

ya que $\rho_b \ell$ es una cantidad característica del material.

Esta suposición no pudo verificarse por tener disponibles datos de a lo sumo dos muestras con el mismo origen. Suponiéndola válida y utilizando los datos de $d=0,0085$ cm y $d=0,031$ cm, se obtuvo $\alpha=0,6 \times 10^{-11}$ ohm cm²

Con este valor de α y nuestro valor medio de $\rho_b \ell$ da una pendiente $(\alpha + \rho_b \ell) = 1,9 \times 10^{-11}$ ohm cm², que está en buen acuerdo con el valor obtenido por Olsen.

El valor promedio de $\rho_b \ell$ proveniente de nuestras mediciones de láminas delgadas es igual a $0,92 \times 10^{-11}$ ohm cm². Este valor es inferior al obtenido por nosotros a partir de los datos de Olsen, pero por otra parte es todavía mayor al considerarlo como mejor según mediciones de efecto skin anómalo 10). Bate et. al. 10) han estudiado la influencia de la anisotropía del camino libre medio en el valor de $\rho_b \ell$ para alambres delgados de indio. El resultado es que debido a la anisotropía el valor experimental es mayor que en el caso isótropo. El origen de la anisotropía de ℓ proviene del hecho que cuando el diámetro del alambre es del orden del tamaño de grano, la muestra puede considerarse como un "policristal unidimensional". En el mismo sentido es posible considerar a las láminas como "policristales bidimensionales", lo que explicaría que el valor de $\rho_b \ell$ esté entre los obtenidos para alambres y el correspondiente a ℓ isótropo.

Agradecemos al Dr. R. P. Platzek por la constante colaboración y asesoramiento durante el desarrollo de este trabajo y al Ing. R. W. Frentzel por su asistencia en la faz electrónica.

BIBLIOGRAFIA

1. FUCHS, K. Proc. Cambridge Phil. Soc., 34, 100 (1938)
2. DINGLE, R. B. Proc. Roy. Soc. (London) A 201, 545 (1950)
3. KAO YI-HAN Phys. Rev., 138, 1412. (1965)
4. CHAMBERS, R. G. Proc. Roy. Soc. (London) A202 378 (1950)
5. RAYNE J. A. and CHANDRASEKHAR, B. S. Phys. Rev. 125, 1952 (1962)
6. OLSEN, J. L. Helv. Phys. Acta, 31, 713 (1958).
7. LUTES, O. S. and CLAYTON, D. A. Phys. Rev. 138, A 1448 (1965)
8. Material producido por The Consolidated Mining and Smelting Company of Canada Limited, con una pureza indicada de 99,9999 %.
9. Se utilizó flujo Divco Heavy Duty.
10. BATE, R. T.; MARTIN; and MILLE, P. F. Phys. Rev. 131, 1482 (1963).

TABLA I

Muestra	Espesor (cm)	$10^{10} \rho_b$ (Ω cm)	$\ell \times 10^2$ (cm)	$10^{11} \rho_b \times \ell$ ($\Omega - \text{cm}^2$)	10^{19}mv (g cm seg $^{-1}$)
In ₅	0,012	1,3	7,25	0,94	1,45
In ₆	0,0055	2,84	3,47	0,98	1,56
In ₇	0,0033	2,72	3,31	0,90	1,53
In ₈	0,0032	3,62	2,46	0,89	1,49
In ₉	0,0065	1,76	5,00	0,88	1,55
In ₁₀	0,011	1,32	6,8	0,90	1,40

Valores experimentales de ℓ , $\rho_b \ell$ y mv, obtenidos a partir de mediciones en láminas delgadas.

TABLA II

diámetro (cm)	$10^{10} \rho_b$ (Ω cm)	$\ell \times 10^2$ (cm)	$10^{11} \rho_b \times \ell$ ($\Omega - \text{cm}^2$)	10^{19}mv (g cm seg $^{-1}$)
0,006	15,0	0,86	1,31	1,39
0,0085	12,1	0,94	1,14	1,32
0,031	8,3	1,82	1,51	1,5

Valores experimentales de ℓ , $\rho_b \ell$ y mv, obtenidos a partir de las mediciones de Olsen en alambres con la regla de Kohler de figura I.

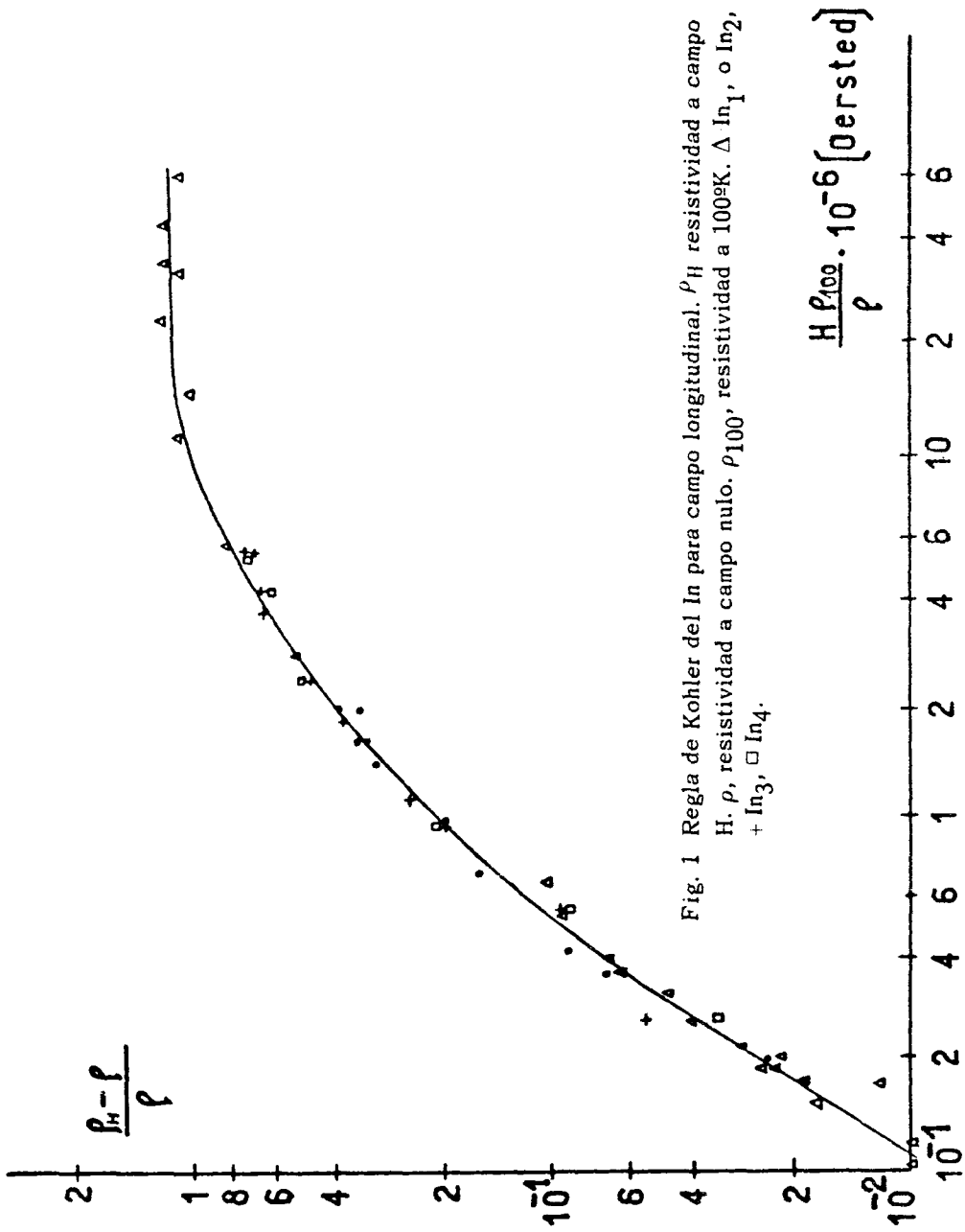


Fig. 1 Regla de Kohler del In para campo longitudinal. ρ_H resistividad a campo H. ρ , resistividad a campo nulo. ρ_{100} , resistividad a 100°K. Δ In_1 , $\circ$ In_2 , $+$ In_3 , $\square$ In_4 .

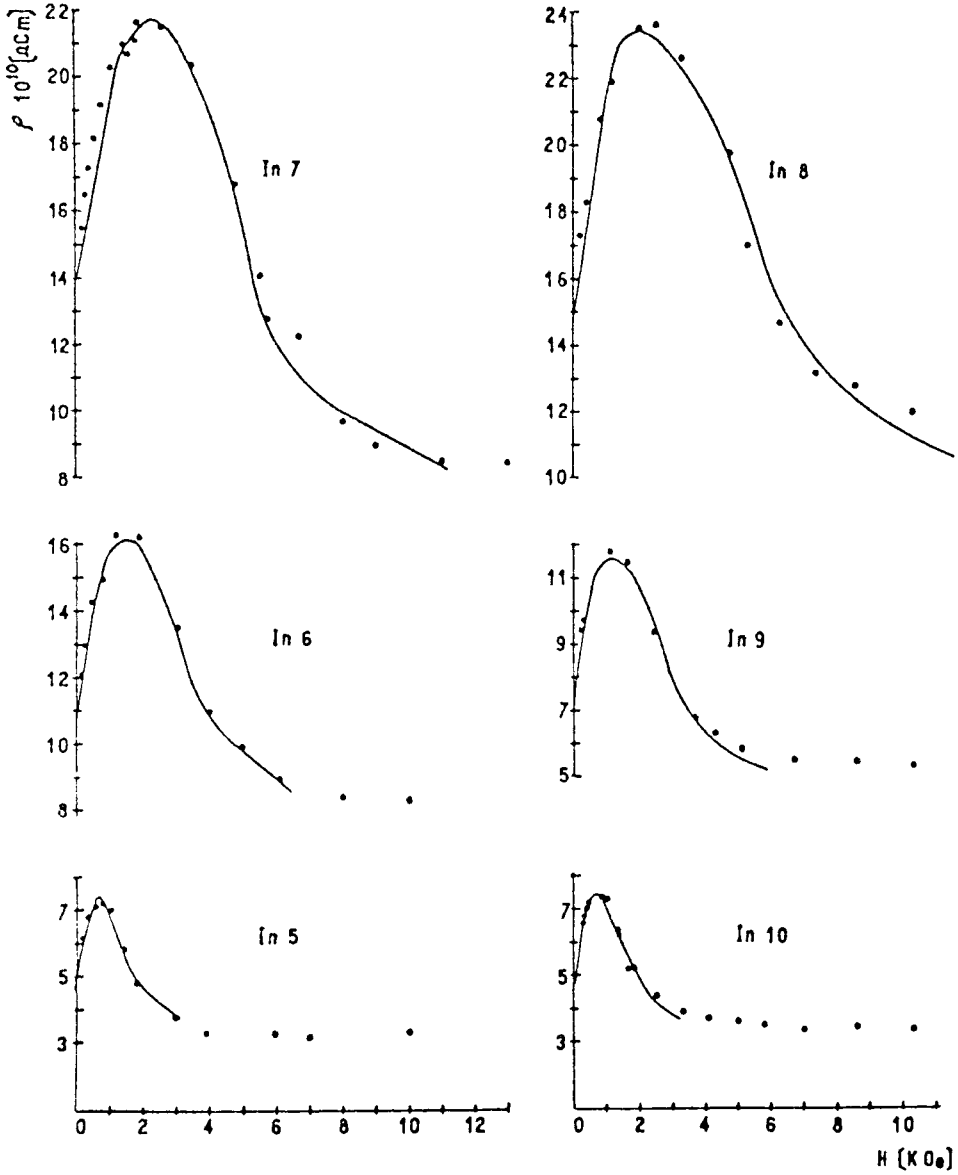


Fig. 2 Resistividad en función de campo magnético a 1.5°K . Las curvas de trazo continuo dan el mejor ajuste con la teoría; usando los parámetros mostrados en tabla I.

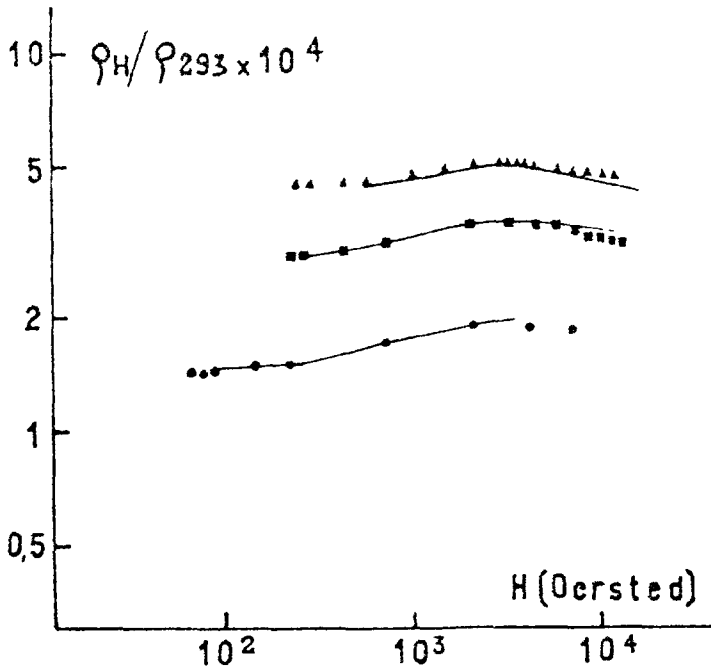


Fig. 3 Resistividad en función de campo magnético a 2°K medida por J.L. Olsen 6). Las curvas de trazo continuo dan el mejor ajuste con la teoría, usando los parámetros mostrados en tabla II.

▲, $\Phi = 0,006$ cm; ■, $\Phi = 0,0085$ cm; ●, $\Phi = 0,031$ cm.

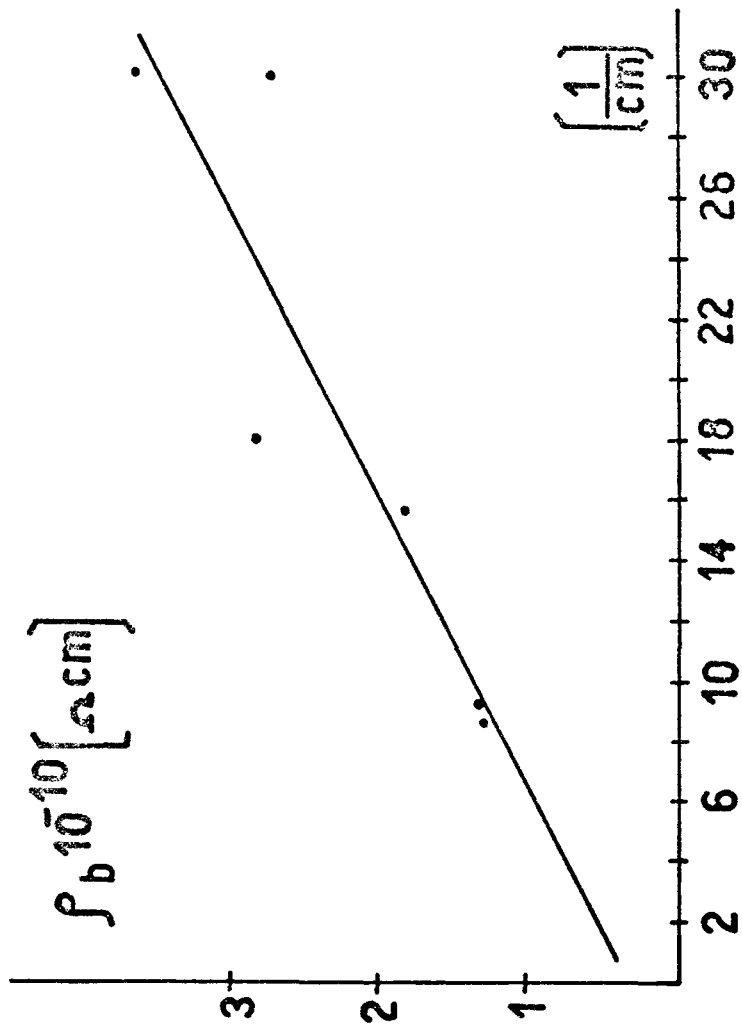


Fig. 4 Resistividad intrínseca en función de la inversa del espesor, $\frac{1}{a}$.

