

Prozeß $C^{12}(\gamma, n)C^{11}$ gemessen und die Aktivität der Proben nach der Methode von HEINTZE und FISCHBECK⁶ absolut bestimmt. Über den recht gut absolut bekannten Wirkungsquerschnitt⁷ der Reaktion $C^{12}(\gamma, n)C^{11}$ läßt sich daraus für ein SCHIFFSches Bremsstrahlungsspektrum die Zahl der γ -Quanten im interessierenden Energieintervall berechnen. Die Verwendung von Kohlenstoff als Monitor⁸ war für dieses Experiment besonders vorteilhaft, weil die auf gleiche Kohlenstoffaktivierung normierten SCHIFF-Spektren von 32 bis 35 MeV Maximalenergie sich gerade bei 28 MeV schneiden, wo der Wirkungsquerschnitt bestimmt wurde. Da die Maximalenergie der benutzten Bremsstrahlung sicher nicht wesentlich über der durch das Protonenspektrum gegebenen unteren Grenze von 32 MeV lag, ist die Genauigkeit der Dosismessung von der exakten Kenntnis der Maximalenergie unabhängig.

Der effektive Raumwinkel, unter dem die erzeugten Photoprotonen in den Photoplaten registriert wurden,

wurde durch Integration über den Strahlquerschnitt berechnet. Damit ergab sich:

$$\sigma(28 \text{ MeV}) = 2,3 \text{ mb},$$

also noch fast die Hälfte des bei 23 MeV gemessenen² Wirkungsquerschnittes für (γ, p) -Prozesse, bei denen N^{15} im Grundzustand zurückbleibt.

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die diese Arbeit ermöglicht hat, ferner Frl. G. MARTIN für ihre Hilfe beim Ausmessen der Protonenspuren.

⁶ J. HEINTZE u. H. FISCHBECK, Z. Phys. **147**, 277 [1957].

⁷ W. C. BARBER, W. D. GEORGE u. D. D. REAGAN, Phys. Rev. **98**, 73 [1955].

⁸ Vgl. auch R. SAGANE, Phys. Rev. **84**, 586 [1951].

Magnetische Untersuchungen an elektrolytisch niedergeschlagenen dünnen Kobaltschichten

Von LUDWIG REIMER

Physikalisches Institut der Universität Münster

(Z. Naturforsch. **12 a**, 1014–1015 [1957]; eingeg. am 7. November 1957)

Nach den Ergebnissen des Verfassers an elektrolytisch niedergeschlagenen und aufgedampften Nickel- und Eisenschichten^{1–5} wird die Größe der Koerzitivkraft bei dünnen Schichten durch die Ausbildung der Eindomänenstruktur bestimmt, was sich vor allem in einem Maximum der Koerzitivkraft bei Schichtdicken von 100 bis 200 Å bemerkbar macht. Diese Maximalwerte der Koerzitivkraft konnten früher mit den Formeln der

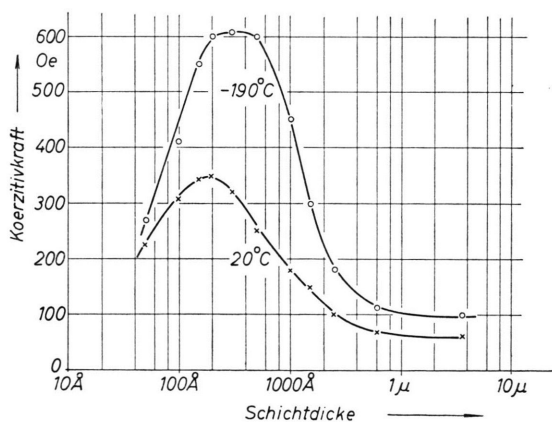


Abb. 1.

Eindomänen-theorie quantitativ gedeutet werden, wenn man je nach der Schichtstruktur Kristall- oder Form-anisotropie als wirksame Anisotropie für die Koerzitiv-krafterhöhung ansetzt. Insbesondere gilt bei Kristall-anisotropie die Formel

$$H_c = 2 K/J_s. \quad (1)$$

Wegen der sehr hohen magnetischen Anisotropie des Kobalts wäre nach dieser Formel, wenn man für K den vielkristallinen Mittelwert als Summe aus Anisotropie-konstante K_1 und K_2 einsetzt, ein sehr hoher Wert der Koerzitivkraft von annähernd 5000 Oe zu erwarten. Die gemessene Schichtdickenabhängigkeit der Koerzitivkraft von elektrolytisch niedergeschlagenen Kobaltschichten (Abb. 1) zeigt jedoch ein völlig anderes Resultat. Die Kobaltschichten wurden mit einer Stromdichte von 6 mA/cm² aus einem CoCl₂-Bad (350 g CoCl₂, 20 g Borsäure auf 1000 cm³ H₂O) auf Elektrolytkupferunterlage abgeschieden. Das maximal angelegte äußere Magnetfeld betrug zwar nur 2000 Oe. Die aufgenommenen Magnetisierungskurven (Abb. 2) zeigen dagegen, daß bei dieser Feldstärke eine vollständige Sättigung der Schichten zu erreichen ist. Um

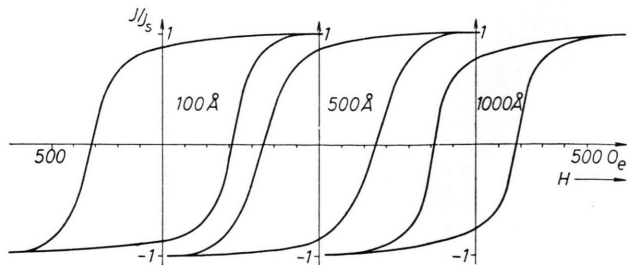


Abb. 2.

¹ L. REIMER, Z. Naturforsch. **10 a**, 1030 [1955].

² L. REIMER, Z. Naturforsch. **11 a**, 649 [1956].

³ L. REIMER, Z. Naturforsch. **12 a**, 550 [1957].

⁴ L. REIMER, Z. Naturforsch. **12 a**, 558 [1957]

⁵ L. REIMER, Z. Phys. **148**, 527 [1957].



diese Diskrepanz mit obiger Formel zu klären, wurden von diesen Schichten Elektronenbeugungsaufnahmen unter streifendem Einfall ausgeführt, die nur Ringe des kubischen Kobalts erkennen ließen, dagegen keine Ringe der hexagonalen Struktur. Frühere Strukturuntersuchungen an elektrolytisch niedergeschlagenen und aufgedampften Kobaltschichten^{6,7} bestätigen dies, wenn auch zuweilen Spuren der hexagonalen Struktur in diesen Arbeiten beobachtet wurden. Gerade bei der elektrolytischen Abscheidung von Kobalt auf Kupfer ist aber eine vorwiegende Abscheidung mit kubischer Struktur zu erwarten, da sich die Gitterkonstanten nur sehr wenig unterscheiden (Cu: 3,61 Å, Co (flz.): 3,55 Å). Leider gelingt es nicht, die Kobaltschichten von der Kupferunterlage abzulösen, so daß elektronenmikroskopische Untersuchungen der Schichtstruktur nicht durchführbar sind. Messungen der magnetischen Eigenschaften des kubischen Kobalts bei Zimmertemperatur an kompaktem Material liegen natürlich nicht vor, da die Umwandlung vom kubischen (Hochtemperaturmodifikation) zum hexagonalen Gitter bei etwa 400 °C erfolgt. Oberhalb dieser Temperatur sind Untersuchungen der Kristallanisotropiekonstanten von Sucksmith und Thompson⁸ durchgeführt. Diese Autoren erwähnen, daß sich ihre Messungen der Anisotropiekonstanten K_1 durch einen Ansatz

$$K_1 = K_{10} e^{-aT^2} \quad (2)$$

beschreiben lassen (K_{10} Anisotropiekonstante am absoluten Nullpunkt, T absolute Temperatur). Ein ähnlicher Ansatz beschreibt die Temperaturabhängigkeit der Anisotropiekonstanten des Nickels bei tiefen Temperaturen annähernd, so daß bei flächenzentriertem Ni und Co dieselben Gesetzmäßigkeiten vorzuliegen scheinen. Mit obiger Formel (2) kann man die Konstante K_1 für 20° und -190 °C extrapolieren:

$K_{1,20^\circ} = 1,7 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$, $K_{1,-190^\circ} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$. Die Anisotropiekonstante von Nickel bei 20 °C beträgt $K_{1,\text{Ni}} = 5 \cdot 10^4 \text{ erg/cm}^3$. Der vielkristalline Mittelwert (regellose Orientierung der Einzelkristallite) berechnet sich zu 7000 erg/cm^3 (Bestätigung durch Messung der reversiblen Magnetisierungsarbeit an polykristallinem und spannungsfreiem Nickel). Aus diesem Wert ergibt sich durch Einsetzen in Gl. (1) $H_c = 30 \text{ Oe}$ in befriedigender Übereinstimmung mit den Experimenten an feinkristallinen Nickelschichten². Aus obigem Wert $K_{1,20^\circ}$ von Co würde sich analog ein Mittelwert von $K \approx 2,3 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$ ergeben, der nach Gl. (1) zu einer Koerzitivkraft $H_c = 320 \text{ Oe}$ führt, was mit dem beobachteten Maximum der Koerzitivkraft in Abb. 1 gut übereinstimmt. Bei Ni-Schichten wurde als Beweis dafür, daß Kristallanisotropie die Koerzitivkraft in feinkristallinen Schichten bestimmt, die Temperaturabhängigkeit der Koerzitivkraft angeführt³. Analoge Messungen bei -190 °C an Co-Schichten sollten mit

$K_{1,-190^\circ}$ zu einem Maximum von $H_c \approx 470 \text{ Oe}$ führen. Auf keinen Fall ist das gemessene Maximum der Koerzitivkraft (Abb. 1) also proportional zu J_s , was bei Vorliegen von Formanisotropie der Fall wäre, weil sich J_s von 20 °C bis -190 °C praktisch nicht ändert. Durch die Abkühlung können in der Co-Schicht noch Verspannungen gegen die Kupferunterlage infolge verschiedener thermischer Ausdehnungskoeffizienten induziert werden, die ebenfalls eine zusätzliche Erhöhung von H_c bewirken können. Diese Betrachtungen zeigen also, daß man die an Eisen- und Nickelschichten gewonnenen Ergebnisse auf flächenzentrierte Kobaltschichten übertragen kann. Einen qualitativ ähnlichen Verlauf der Koerzitivkraft elektrolytisch niedergeschlagener Co-Schichten bei Zimmertemperatur erhielten Drigo und Pizzo⁹, die mit ihrer Meßanordnung aber keine Magnetisierungskurven aufnehmen konnten und auch keine Strukturuntersuchungen der Schichten durchführten.

Es wurden auch Untersuchungen an aufgedampften Co-Schichten mit Glas und Elektrolytkupfer als Unterlage durchgeführt. Elektronenbeugungsaufnahmen unter streifendem Einfall zeigten ebenfalls vorwiegend kubisch flächenzentrierte Struktur der Schichten. Nach dem Herstellungsverfahren zu schließen, liegt aber eine sehr feinkristalline Schichtstruktur vor. Es ergeben sich nur maximale Koerzitivkräfte von etwa 100 Oe. Eine derartige Erniedrigung der Koerzitivkraft bei dünnen Schichten unter den Wert, der durch Kristallanisotropie als Mindestwert zu erwarten wäre, ist auch vom Verfasser an sehr feinkristallinen Nickel-Aufdampfschichten auf kalter Unterlage gefunden worden^{2,3}. Die magnetischen Eigenschaften dieser Schichten ließen sich nicht ohne weiteres mit der Eindomänentheorie erklären, weil offenbar die Streufelder zwischen benachbarten Kristalliten zu groß werden.

Abschließend sei noch auf Messungen der Koerzitivkraft kleinster Teilchen in Form von Co-Amalgamen von Meiklejohn¹⁰ hingewiesen, der Maximalwerte von etwa 1000 Oe fand, welche auch an Fe-Amalgamen gefunden wurden. Aus elektronenmikroskopischen Untersuchungen konnte Meiklejohn schließen, daß diese hohen Koerzitivkräfte durch Formanisotropie hervorgerufen werden. Da Eisen und Kobalt größenordnungsmäßig die gleiche Sättigungsmagnetisierung aufweisen, ist bei gleicher Form der Teilchen auch Übereinstimmung in den Werten der Koerzitivkraft zu erwarten. Dies gilt aber nur dann, wenn die Kristallanisotropie des Kobalts kleiner als die entsprechende Formanisotropie der kleinen Teilchen wird. Es ist daher anzunehmen, daß auch im Co-Amalgam die Teilchen kubische Struktur haben. Dies ist besonders deshalb wahrscheinlich, weil bei vielen Untersuchungen die Co-Amalgame durch elektrolytische Abscheidung mit flüssigem Quecksilber als Kathode hergestellt werden.

⁶ L. Brück, Ann. Phys., Lpz. **26**, 233 [1936].

⁷ Vgl. H. Fischer, Elektrolytische Abscheidung u. Elektrokristallisation von Metallen, Springer-Verlag, Berlin 1954.

⁸ W. Sucksmith u. J. E. Thompson, Proc. Roy. Soc., Lond. (A) **225**, 362 [1954].

⁹ A. Drigo u. M. Pizzo, Nuovo Cim. **6**, 327 [1949].

¹⁰ W. H. Meiklejohn, Rev. Mod. Phys. **25**, 302 [1953].