

erhält man ohne und mit Berücksichtigung des Spins den durch

$$E(\mathbf{K}) = E + F K_x^2 + (G K_y + H K_z)^2$$

gegebenen Bandverlauf. Die zweifache Entartung im Spinfall ist eine Folge der Zeitumkehrsymmetrie. Die

Energieflächen sind dreiachsige Ellipsoide. In Abb. 2 sind die hier diskutierten Bandverläufe skizziert. Für alle anderen Punkte der BRILLOUIN-Zone ist $\nabla_{\mathbf{K}} E$ wenigstens in einer Richtung von Null verschieden, so daß nur in den Punkten Γ , Z , A und D Extrema vorausgesagt werden können.

Ein neues Verfahren zur kontaktlosen Messung der elektrischen Leitfähigkeit dünner Schichten

Von E. HUSTER, WILFRIED RAUSCH und JULIUS SCHMAND

Institut für Kernphysik, Münster

(Z. Naturforsch. 19 a, 1126—1127 [1964]; eingegangen am 27. Juni 1964)

In vielen Fällen kann man die elektrische Leitfähigkeit dünner Schichten nicht durch eine Strom-Spannungsmessung bestimmen, da es schwierig ist, geeignete Kontakte an der Schicht anzubringen. Auch liefert eine Strom-Spannungsmessung immer dann ungenaue Aussagen, wenn der Flächenwiderstand R_{\square} nicht über die ganze Schicht konstant ist ($R_{\square} = \rho/d$; ρ = spezifischer Widerstand, d = Dicke der Schicht).

Zur *kontaktlosen* Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit verwendet man oft die Induktionsspule eines Schwingungskreises. Die Änderung der Resonanzfrequenz des Kreises bei Annäherung der Spule an die Schicht ist ein Maß für deren Leitfähigkeit. Inhomogenitäten der Schicht lassen sich nachweisen, indem man die Spulenfläche parallel zur Schicht bewegt.

Dies Verfahren eignet sich jedoch nur für relativ gut leitende Schichten. Der Bereich, in dem beim Aufdampfen von Metallschichten der Flächenwiderstand von Werten oberhalb $10^{10} \Omega$ auf einige Ω abfällt, läßt sich mit diesem Verfahren nicht zuverlässig erfassen.

Für diesen Bereich wurde ein *kapazitiv* arbeitendes Verfahren entwickelt, bei dem man die Änderung des Flächenwiderstandes während des Aufdampfens messend verfolgen kann. Eine gut leitende Metallplatte wird parallel zu der zu messenden Schicht angebracht und die Kapazität zwischen Platte und Schicht gemessen. Kann man an der Schicht selbst einen Kontakt

anbringen, so arbeitet man zweckmäßig in der in Abb. 1 a dargestellten Anordnung. Ist das nicht möglich, so arbeitet man mit der Anordnung nach Abb. 1 b, bei der zwei leitende Metallplatten (K_1 und K_2) parallel zur Schicht angeordnet sind.

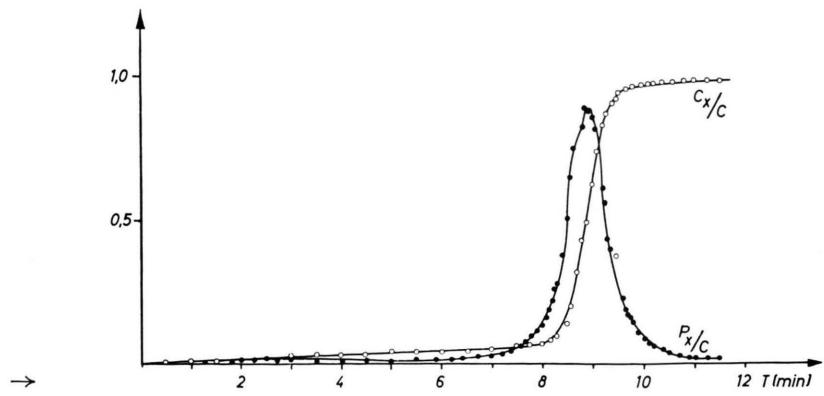
In beiden Fällen ist für $R_{\square} = \infty$ die zwischen K_1 und K_2 gemessene Impedanz $Z \approx 0$, für $R_{\square} = 0$ ist $Z \approx 1/j\omega C$, wobei C die statische Kapazität zwischen K_1 und K_2 , j die imaginäre Einheit und ω die Kreisfrequenz ist. Abb. 2 zeigt ein Beispiel einer Impedanzmessung an einer Ag-Schicht in Abhängigkeit von der Aufdampfzeit, der die Schichtdicke nahezu proportional ist (allerdings wird der Proportionalitätsfaktor sich bei verschiedenen Aufdampfungen unterscheiden). Aufgetragen sind die beiden dimensionslosen Größen $P_x/C = 2/\omega C R_x$ und C_x/C , die proportional zu Real- und Imaginärteil von $1/Z = 1/R_x + j\omega C_x$ sind. Ist ein bestimmter Flächenwiderstand erreicht, so steigt bei weiterem Aufdampfen C_x/C schnell von nahezu 0 auf 1; im gleichen Bereich durchläuft P_x/C ein Maximum, dessen Ordinate unter 1 liegt. (Der Zahlenwert hängt von der Form der Schicht und der Kontakte ab.)

Der Anstieg der gemessenen Kapazität C_x zum statischen Wert C rückt natürlich zu um so größeren Schichtdicken, d. h. kleineren R_{\square} , je größer ω ist. Man kann zeigen, daß die Meßgrößen P_x/C und C_x/C nur von dem Produkt $\omega R_{\square} C$ abhängen, und daß insbesondere der Wert $(\omega R_{\square} C)_{\max} = K$ im Maximum von P_x/C nur von der Geometrie der Anordnung (Größe der Schicht, Form der Kontakte usw.) abhängt. K läßt sich nur in einfachen Fällen ohne größeren Aufwand berechnen; auch eine experimentelle Bestimmung kann schwierig sein. — Da P_x/C und C_x/C nur von $(\omega R_{\square} C)$ abhängen, erhält man Kurven wie in Abb. 2 auch dann, wenn man statt R_{\square} entweder ω oder C ändert.



Abb. 1. Meßanordnungen schematisch: a) dünne Schicht mit Kontakt K_1 , parallel dazu Metallplatte K_2 . b) Dünne Schicht ohne Kontakt, parallel dazu zwei Metallplatten K_1 und K_2 .

Abb. 2. P_x/C und C_x/C einer Ag-Schicht auf Formvarunterlage von $30 \times 60 \text{ mm}^2$ in Abhängigkeit von der Aufdampfzeit T , gemessen mit einer Wayne-Kerr Universal Bridge in der Anordnung nach Abb. 1 a ($\omega = 10^4 \text{ sec}^{-1}$, $C \approx 6 \text{ pF}$).



1. Messung bei veränderlichem ω

Mißt man zunächst P_x/C und C_x/C an einer Schicht mit bekanntem R_\square in Abhängigkeit von ω , so erhält man für die gegebene Anordnung den Zusammenhang der Meßgrößen mit $(\omega R_\square C)$ und insbesondere den Wert $K = (\omega R_\square C)_{\max}$. Ist K dann bekannt, so kann man (in exakt gleicher geometrischer Anordnung) R anderer Schichten bestimmen, indem man P_x/C und/oder C_x/C als Funktion von ω mißt.

Besteht die Schicht aus Gebieten mit verschiedenen R_\square , so ist die Bedingung $\omega R_\square C = K$ für das Maximum von P_x/C nicht für die gesamte Schicht mit derselben Frequenz zu erfüllen. In solchen Fällen verbreitert sich das Maximum der Kurve P_x/C oder es treten mehrere Maxima auf; entsprechend steigt C_x/C weniger steil an als bei homogener Schicht oder es steigt in mehreren Stufen auf den Endwert 1.

2. Messung bei veränderlichem C

Die Bedeutung dieser Methode ist gering, da man C (durch Änderung des Abstandes zwischen Schicht und Platte) praktisch nur um einen wesentlich kleineren Faktor ändern kann als die Frequenz. Nur wenn es auf einem möglichst großen Meßbereich ankommt, kann man $(\omega R_\square C)$ außer durch den verfügbaren Frequenzbereich zusätzlich noch durch Variation von C ändern.

3. Messung bei veränderlichem R_\square

Abb. 2 zeigt eine solche Messung. Mit dieser Methode kann man Schichten mit gewünschtem R_\square herstellen, sofern man den Wert von K für die vorliegende Anordnung kennt. Zweckmäßig wählt man dazu $\omega = K/R_\square C$, wo R_\square der gewünschte Flächenwiderstand ist, und bricht die Bedämpfung ab, wenn P_x durch sein Maximum geht. Dabei muß C_x ungefähr den Wert $C/2$ erreicht haben. Ist das nicht der Fall, so kann man daraus schließen, daß die Schicht inhomogen ist. Abb. 3 zeigt eine Messung an einer Schicht, die vor dem Aufdampfen des Silbers zur Hälfte mit Kohlenstoff „bekernt“ wurde¹. Auf dem bekernten Teil wird der gewünschte Wert von R_\square bei geringeren Schichtdicken erreicht als auf dem unbekerten. Die Bedingung $(\omega R_\square C)_{\max} = K$ wird deshalb für die beiden Teilbereiche bei verschiedenen Aufdampfzeiten erreicht. Demgemäß treten zwei Maxima von P_x/C auf und C_x/C steigt in zwei Stufen auf den Wert Eins.

Das Verfahren wurde bei der Herstellung und Prüfung von Präparatunterlagen für absolute β -Zählung verwendet. Dabei wurden Formvarfolien mit Massenbelägen von 1 bis $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ mit Ag-Schichten von 1 bis $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ bedämpft. Die gemessenen Flächenwiderstände lagen zwischen 10^{10} und 10^3 Ohm . Bei Aufdampfungen mußten i. allg. stärkere Unterlagen verwendet werden.

Eine ausführliche Darstellung erscheint in Kürze.

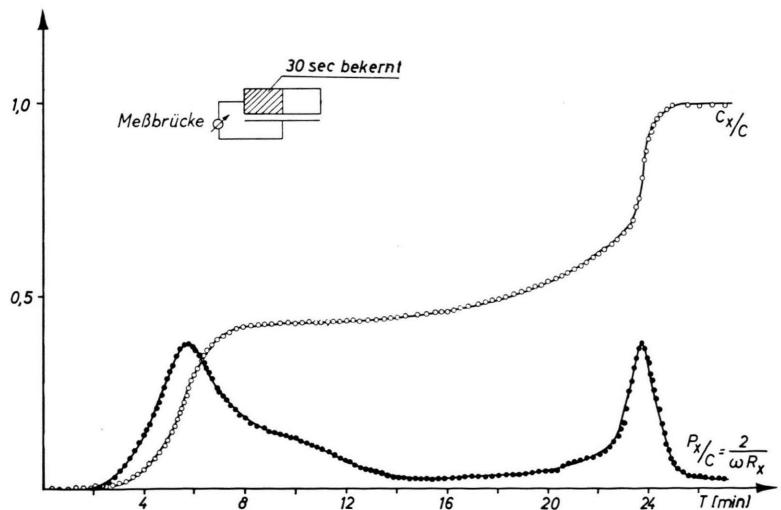


Abb. 3. Messung wie in Abb. 2 an einer Ag-Schicht auf einer zum Teil mit Kohlenstoff bekernten Formvarunterlage.

¹ E. HUSTER u. W. RAUSCH, Nucl. Instrum. 3, 213 [1958]; 6, 217 [1960].