

phys. stat. sol. **17**, 489 (1966)*Physikalisches Institut der Sibirischen Abteilung der Akademie der Wissenschaften
der UdSSR, Krasnojarsk*

Magnetische Mehrfachschichten¹⁾

Von

L. V. KIRENSKII, T. P. ISOTOVA, N. M. SALANSKII und N. S. CHISTYAKOV

Es werden die Wechselwirkung zweier magnetischer FeNi und FeNiCo Schichten, die durch eine SiO₂-Schicht getrennt sind und einige Besonderheiten bei der Transmission elektromagnetischer Mikrowellen durch geschichtete dünne Magnetschichten, die durch SiO₂ getrennt sind, untersucht. Dabei wird gefunden, daß die Koerzitivkraft der Schichten in einem Vielschichtsystem abnimmt. Dieser Effekt wird durch lokale magnetische Wechselwirkung zwischen den magnetischen Schichten erklärt. Die Abnahme der Koerzitivkraft hängt von der Schichtdicke ab und wird durch den wechselnden Charakter der lokalen Wechselwirkung erklärt. Die Transmissions- und Reflexionskoeffizienten wurden gemessen; sie hängen von der Dicke der einzelnen Schichten und von der Gesamtdicke der ferromagnetischen Metallschichten in dem Vielschichtsystem ab. Die Transmissionskoeffizienten für Vielschichtsysteme sind wesentlich größer als bei der einzelnen Schicht. Die Transmission der Mikrowellenenergie durch die Vielschichtsysteme wird im Rahmen der gewöhnlichen Elektrodynamik erklärt.

В работе изучается: 1) характер взаимодействия двух магнитных пленок FeNi и FeNiCo, разделенных слоем SiO₂; 2) особенности прохождения электромагнитного СВЧ-поля через многослойные магнитные тонкие пленки, разделенные слоем SiO₂. Обнаружено уменьшение коэрцитивной силы пленок, расположенных в многослойной системе. Этот эффект объясняется локальным магнитным взаимодействием между магнитными слоями. Уменьшение коэрцитивной силы зависит от толщины пленок и объясняется изменением характера локального взаимодействия. Измерены коэффициенты прохождения и отражения (по мощности) в зависимости от толщины однослойных пленок и суммарной толщины слоев ферромагнитного металла в многослойной системе. Оказалось, что коэффициенты прохождения для многослойных систем существенно больше коэффициента прохождения для однослойной пленки. Особенности прохождения СВЧ-энергии через многослойные пленки объясняются в рамках обычной электродинамики.

In einer Reihe von Arbeiten, die dem theoretischen und experimentellen Studium der magnetischen Eigenschaften von Mehrfachschichten und ihrer praktischen Anwendung gewidmet sind [1 bis 12], wurde gezeigt, daß die Mehrfachschichten in einigen Fällen einen Vorteil gegenüber den Einfachschichten haben. Die Mehrfachschichten haben bessere Impulscharakteristiken [8, 9], sie geben die Möglichkeit, Gedächtniselemente mit nichtzerstörender Auslesung (NDRO) zu bauen [10, 11], und sie besitzen mehrere stabile Zustände. Eine

¹⁾ Beitrag zum Internationalen Kolloquium über magnetische dünne Schichten, 25. bis 28. April 1966 in Jena.

Reihe von interessanten Besonderheiten haben auch die Mikrowelleneigenschaften von magnetischen Mehrfachschichten [13, 14], die vermuten lassen, daß diese in Zukunft auch Anwendung in der Mikrowellentechnik, z. B. als magneto-gyrotrope Elemente, finden werden. Gleichzeitig ist eine Reihe von Fragen, die mit dem Einfluß der Zusammensetzung, der Schichtdicken und der Aufdampfbedingungen auf die Größe der Koerzitivkraft, die Form der Hystereseschleife und die Mikrowelleneigenschaften zusammenhängen, noch ungenügend untersucht.

In der vorliegenden Arbeit werden die Resultate der Untersuchung einiger magnetischer und Mikrowelleneigenschaften von magnetischen Mehrfachschichten angegeben.

1. Herstellung der Schichten

Die Schichten wurden durch thermisches Verdampfen der Substanz in einem Vakuum von 5×10^{-5} Torr in einem Feld von $H = 100$ Oe hergestellt. Die magnetischen Schichten wurden durch eine Quarz- oder Glasschicht getrennt. Als Unterlage dienten optisch polierte Deckgläschen.

Es wurden folgende Dünnschichtsysteme hergestellt und untersucht:

a) Doppelschichten. Bei der Herstellung von Doppelschichten wurden folgende Legierungen benutzt: Fe-Ni-Co (30% Fe, 45% Ni, 25% Co) — relativ hochkoerzitiv (hk), Fe-Ni (20% Fe, 80% Ni) — niederkoerzitiv (nk). Beim Aufdampfen der hk-Schicht betrug die Temperatur der Unterlage 300 °C, beim Aufdampfen der nk-Schicht 200 °C.

b) Einfachschichten aus den Legierungen Fe-Ni, Fe-Ni-Co und auch Einfachschichten mit einem Überzug aus SiO_2 . Die Dicke des SiO_2 war in allen Fällen ≈ 2000 Å.

c) Mehrfachschichten. Zur Untersuchung der Mikrowelleneigenschaften wurden Mehrfachschichtsysteme hergestellt, in denen die Zahl der ferromagnetischen Metallschichten (17% Fe, 80% Ni, 3% Mo) gleich 5, 10, 20 oder 30 war. Alle diese Schichten hatten die gleiche Dicke von 1000 Å und waren durch 1500 bis 2000 Å dicke SiO_2 -Schichten voneinander getrennt.

2. Untersuchungsmethoden

Folgende Effekte bzw. physikalischen Größen wurden an den Schichten untersucht: die Koerzitivkraft, die Hystereseschleifen, der Barkhausen-Effekt und die Bereichsstruktur, die Änderung der Mikrowellen-Suszeptibilität in schwachen Magnetfeldern unter den Bedingungen der quasistatischen Ummagnetisierung und die Durchlässigkeit einer elektromagnetischen Welle des Mikrowellengebiets ($f = 9000$ MHz) beim Durchgang durch ein Mehrfachschichtsystem in Abhängigkeit von der Zahl der ferromagnetischen Schichten.

Die Dicke der Schichten wurde mit dem Monochromator UM-2 gemessen. Die Hystereseschleifen wurden mit einer Induktionsmethode aufgenommen. Der Barkhausen-Effekt wurde mit der in den Arbeiten [15, 16] beschriebenen Anordnung untersucht. Die Bereichsstruktur wurde mit Hilfe des magnetooptischen Kerr-Effektes und der Bitter-Akulov-Methode beobachtet. Die Mikrowelleneigenschaften wurden mit Anordnungen untersucht, die den in den Arbeiten [14, 17] beschriebenen ähnlich sind.

3. Beobachtungsergebnisse

In Fig. 1 sind die Hystereseschleifen von Doppelschichten und Einfachschichten dargestellt, die der Zusammensetzung nach mit den Teilschichten identisch sind. Die Richtungen der leichten Achsen in den Schichten sind parallel. Wie man Fig. 1 entnimmt, ist die Breite der Hystereseschleifen eines Schichtsystems wesentlich schmäler als die der Hystereseschleifen der entsprechenden Einfachschichten. Bei einer Feldamplitude von ± 1 Oe wird nur eine Schicht der Doppelschicht ummagnetisiert. Für Doppelschichten mit zueinander senkrechter Orientierung der leichten Achsen erhält man ebenfalls eine Abnahme von H_c .

In Tabelle 1 sind die H_c -Werte der magnetischen Schichten in Abhängigkeit von den Richtungen der leichten Achsen für die Teilschichten der Doppelschicht und für die Einfachschichten angegeben.

Tabelle 1

Zusammensetzung	Richtung der leichten Achsen	Um-magn. Feld H (Oe)	hk-Schicht H_{c1} (Oe)	nk-Schicht H_{c2} (Oe)	Dicke der hk-Schicht t_1 (Å)	Dicke der nk-Schicht t_2 (Å)
Fe-Ni-Co/SiO ₂ /Fe-Ni		4,1	3,4	0,4	1200	500
Fe-Ni-Co/SiO ₂ /Fe-Ni	⊥	4,1	3,4	0,4	1200	500
Fe-Ni-Co	—	11,0	8,8	—	1200	—
Fe-Ni	—	3,2	—	2,2	—	500

Wie man aus Tabelle 1 ersieht, sind die H_c -Werte der als Teil eines Schichtsystems aufgedampften magnetischen Schichten wesentlich kleiner als die Koerzitivkraft der entsprechenden Einfachschichten. Aus Tabelle 1 sieht man auch, daß die Verringerung von H_c der Schichten nicht von der gegenseitigen Lage der leichten Achsen abhängt.

Der Aufdampfwinkel der hk-Schicht beeinflusst die Abnahme der Koerzitivkraft der nk-Schicht wesentlich, aber die Streuung von H_c ist beim Aufdampfen unter einem Winkel größer als beim normalen Aufdampfen.

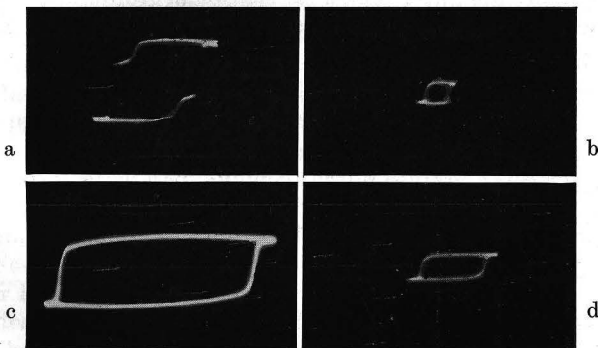


Fig. 1. Hystereseschleifen von Doppel- und Einfachschichten
a) Fe-Ni-Co/SiO₂/Fe-Ni $H = \pm 4,1$ Oe, b) Fe-Ni-Co/SiO₂/Fe-Ni $H = \pm 1$ Oe, c) Fe-Ni-Co $H = \pm 11$ Oe, d) Fe-Ni $H = \pm 3,2$ Oe

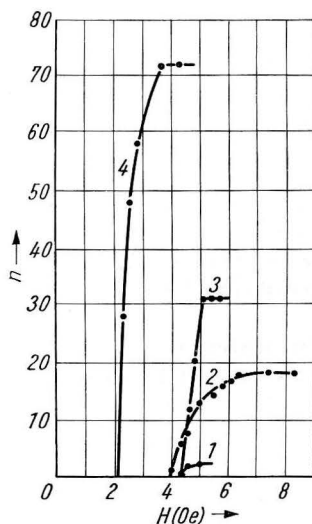


Fig. 2. Integralkurven für die Verteilung der Barkhausen-Sprünge über das Feld für die hochkoerzitive Schicht

(1) Fe-Ni-Co, (2) Fe-Ni-Co/SiO₂, (3) SiO₂/Fe-Ni-Co, (4) Fe-Ni-Co/SiO₂/Fe-Ni

Bei der Herstellung von Mehrschichten können deren Teilschichten durch Teilchen der anschließend aufgedampften Schichten verunreinigt werden; das kann zu einer Änderung der magnetischen Eigenschaften der Schichten führen.

Um diesen Punkt zu klären, wurden folgende Schichtsysteme untersucht: a) Fe-Ni-Co/SiO₂/Fe-Ni) und b) Schichten, die auf Quarz aufgedampft wurden. Die Dicke der hk-Schicht war 1200 Å, die der nk-Schicht 500 Å. Alle Beobachtungen wurden bei Ummagnetisierung der Schichten in der leichten Richtung durchgeführt.

In Fig. 2 sind die Verteilungskurven für die Zahl der Barkhausen-Sprünge in der hk-Schicht über dem Feld für verschiedene Fälle dargestellt. Die

Verteilung der Zahl der Barkhausen-Sprünge über dem Feld ist für die isolierte Schicht durch Kurve 1 dargestellt. Das Aufdampfen des Quarzes wirkt sich stark auf die Homogenität der hk-Schicht aus. Die Schicht wird inhomogener. Die Zahl der Barkhausen-Sprünge nimmt zu, und sie erstrecken sich über ein größeres Feldintervall (Kurve 2 und 3).

Wenn auf die hk-Schicht eine zweite magnetische Schicht aufgedampft wird (Kurve 4), wird die Zahl der Barkhausen-Sprünge noch größer, und die Kurve selbst verschiebt sich wesentlich zu schwachen Feldern hin. Die wesentliche Zunahme der Zahl der Barkhausen-Sprünge wird für den durch Kurve 4 dargestellten Fall offenbar durch die magnetische Wechselwirkung der Schichten und durch die Zunahme der Inhomogenitäten wegen der Diffusion der Quarzteilechen hervorgerufen, weil die hk-Schicht, die mit Quarz überzogen ist, vor dem Aufdampfen der nk-Schicht geglättet wird.

Um den Einfluß der Diffusion nachzuprüfen, wurde die mit einer Quarzschicht überzogene hk-Schicht einer Wärmebehandlung unterworfen, die den Bedingungen entspricht, unter denen sie sich beim Aufdampfen der nk-Schicht befand. Solche Schichten ergaben eine gewisse Zunahme der Zahl der Bark-

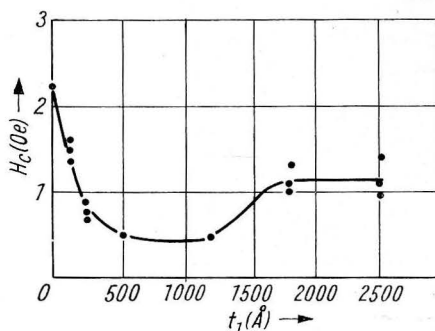


Fig. 3. Abhängigkeit der Koerzitivkraft H_c einer niederkoerzitiven Schicht von der Dicke t_1 der hochkoerzitiven Schicht. Dicke der nk-Schicht 500 Å

hausen-Sprünge im Vergleich zu Schichten mit der gleichen Zusammensetzung, die aber nicht gegläht waren. Die Ergebnisse zeigen, daß die mechanischen Inhomogenitäten, die mit dem Eindringen von Quarzteilen in die magnetischen Schichten zusammenhängen, zwar auf den Charakter des Ummagnetisierungsprozesses der Schichten einwirken, die Größe von H_c aber praktisch nicht beeinflussen.

Die Abhängigkeit von H_c von der Dicke der Fe-Ni-Einfachschichten wurde in den Arbeiten [18 bis 20] untersucht. Der Versuch zeigt, daß H_c einer Fe-Ni-Schicht von den Dicken der anderen Schichten abhängt. In Fig. 3 ist für Schichten vom Typ a) H_c für eine bezüglich der Dicke konstante nk-Schicht als Funktion der Dicke der hk-Schicht graphisch dargestellt. Die Dicke der nk-Schicht war 500 Å. Wie man aus Fig. 3 ersieht, nimmt H_c der nk-Schicht mit wachsender Dicke der hk-Schicht ab, erreicht ein Minimum bei einer Dicke der hk-Schicht von etwa 1000 Å; danach nimmt H_c wieder zu. Bei Schichtdicken größer als 1800 Å hängt H_c der nk-Schicht nicht von der Dicke der hk-Schicht ab. Bei allen betrachteten Dicken der hk-Schicht bleibt H_c der nk-Schicht kleiner als das der Einfachschicht.

4. Magnetische Wechselwirkung der Schichten in einer Doppelschicht

Wie man aus Fig. 3 ersieht, hängt H_c der nk-Schicht sehr kompliziert von der Dicke der hk-Schicht ab. Eine solche Abhängigkeit kann man nicht durch die Änderung der Wandenergie mit der Änderung der Schichtdicke, durch elastische Spannungen oder Eigenschaften der Unterlage usw. erklären. Durch die aufgezählten Ursachen wird gewöhnlich die Dickenabhängigkeit der Koerzitivkraft von Einfachschichten erklärt [19, 20]. Alle diese Faktoren werden sich in irgendeinem Maße auf die Änderung von H_c der magnetischen Teilschichten einer Mehrfachschicht auswirken; der entscheidende Grund für eine solche Änderung von H_c ist aber wahrscheinlich die magnetische Wechselwirkung der Schichten.

Diese Wechselwirkung kann sowohl makroskopisch [10] als auch mikroskopisch [2] sein. Die Wirkung von makroskopischen Magnetfeldern muß offensichtlich von den Richtungen der leichten Achsen der Schichten abhängen. Wie oben gezeigt wurde (siehe Tabelle 1), können makroskopische Felder keine Abnahme von H_c in Doppelschichten hervorrufen. Diese experimentelle Tatsache ist wahrscheinlich bis zu bestimmten Dickenwerten richtig.

Was die mikroskopische Wechselwirkung anbetrifft, so entsteht sie als Resultat der Streufelder, die sich von Punkt zu Punkt ändern können. Eine solche Wechselwirkung kann durch die Topographie der Schichtoberfläche bedingt sein, weil die Schichten keine ideal glatte, sondern eine „raue“ Oberfläche haben, wobei die „Rauigkeit“ bei dem anschließenden Aufdampfen einer Schicht verstärkt werden kann. Durch die „Rauigkeit“ der Oberfläche werden lokale Streufelder hervorgerufen. Diese Felder können sich in Doppelschichten schließen, wodurch sie günstige Bedingungen für die Bildung von Ummagnetisierungskeimen in den Schichten schaffen.

Das Studium des Einflusses der Streufelder wurde an Schichten der Zusammensetzung Fe-Ni-Co/SiO₂/Fe-Ni durchgeführt. Die Dicke der nk-Schicht war 500 Å, die der hk-Schicht änderte sich.

Mit Hilfe des Kerr-Effektes wurde die Bereichsstruktur der nk-Schicht bei unterschiedlicher Dicke der hk-Schicht untersucht. Um kleine Ummagnetisierungskeime sichtbar zu machen, wurde die Methode der Pulverfiguren benutzt. Durch Kurve 1 von Fig. 4 ist die Abhängigkeit des Keimbildungsfeldes H_z der

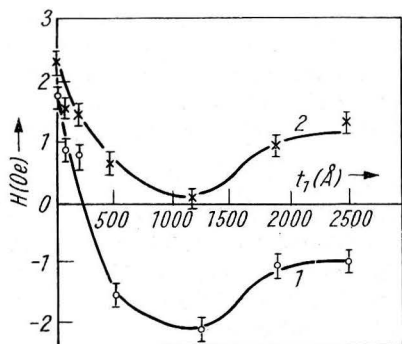


Fig. 4. Abhängigkeit des Keimbildungsfeldes (Kurve 1) und der Koerzitivkraft H_c (Kurve 2) einer nk-Schicht von der Dicke t_1 der hk-Schicht

nk-Schicht von der Dicke der hk-Schicht dargestellt. Wie man dem Verlauf der Kurve 1 entnimmt, entstehen Keime der umgekehrten Magnetisierung in der nk-Schicht bei einer Dicke t_1 der hk-Schicht von über 300 Å in negativen Feldern. Mit wachsender Dicke der hk-Schicht nimmt der Betrag dieses Feldes zu und hat bei einer Schichtdicke von 1200 Å ein Maximum. Von einer Dicke der hk-Schicht von 1800 Å an bleibt die Größe des Keimbildungsfeldes negativ und betragsmäßig konstant. Bei einer Dicke der hk-Schicht von weniger als 300 Å entstehen Keime der umgekehrten Magnetisierung in positiven Feldern, wie man aus Kurve 1 ersieht. Dieser Teil der Kurve erfordert aber eine gewisse Korrektur, weil diese Schichten, die mit der Pulvertechnik untersucht wurden, nach der Magnetisierung der Schichten und dem Abschalten des Feldes Keime enthielten, wobei es sich zeigte, daß die Lage dieser Keime in der nk-Schicht nicht von der gegenseitigen Orientierung der Magnetisierung der einzelnen Teilschichten abhängt. In Fig. 5 sind Aufnahmen gezeigt, auf denen die Keime der umgekehrten Magnetisierung in den nk-Schichten bei verschiedenen Dicken der hk-Schicht für zwei verschiedene gegenseitige Orientierungen der Magnetisierungen der Schichten für verschwindendes Feld zu sehen sind. Die Aufnahmen Fig. 5a und 5b entsprechen dem Mittelteil der Schicht und Fig. 5c dem Rand.

Den Fig. 4 und 5 entnimmt man, daß sich der Charakter und die Stärke der magnetischen Wechselwirkung der Schichten mit wachsender Dicke der hk-Schicht ändern. Das wirkt sich auf die Morphologie der Bereichsstruktur der nk-Schicht aus. Die Bedingungen für das Entstehen und das Wachstum eines Keimes für eine nk-Schicht konstanter Dicke bei ihrer Ummagnetisierung hängen von der Dicke der hk-Schicht ab. Bei Dicken der hk-Schicht von 100 bis 1200 Å wird die nk-Schicht durch Bildung und Wachstum von Keimen der umgekehrten Magnetisierung sowohl im Zentrum als auch an den Rändern der nk-Schicht ummagnetisiert. Bei dickeren Schichten entstehen in der nk-Schicht zuerst Keime an den Rändern, die den ganzen Rand erfassen, und erst danach dehnen sich die Keime in den zentralen Teil aus.

Die Entstehung von Keimen der umgekehrten Magnetisierung bei negativen äußeren Feldern und ihre Verteilung über die Oberfläche der nk-Schicht deuten auf die Existenz von inhomogenen lokalen magnetischen Feldern hin, deren Verteilungscharakter von den Dicken der magnetischen Schichten abhängt. Mit wachsender Dicke der hk-Schicht kann sich die Größe und der Lokalisierungsgrad dieser Felder ändern. Das kommt durch die Verteilung der Barkhausen-Impulse über den Feldern in Doppelschichten zum Ausdruck. Untersuchungen, die an Doppelschichten (mit unterschiedlicher Dicke der hk-Schicht) mit par-

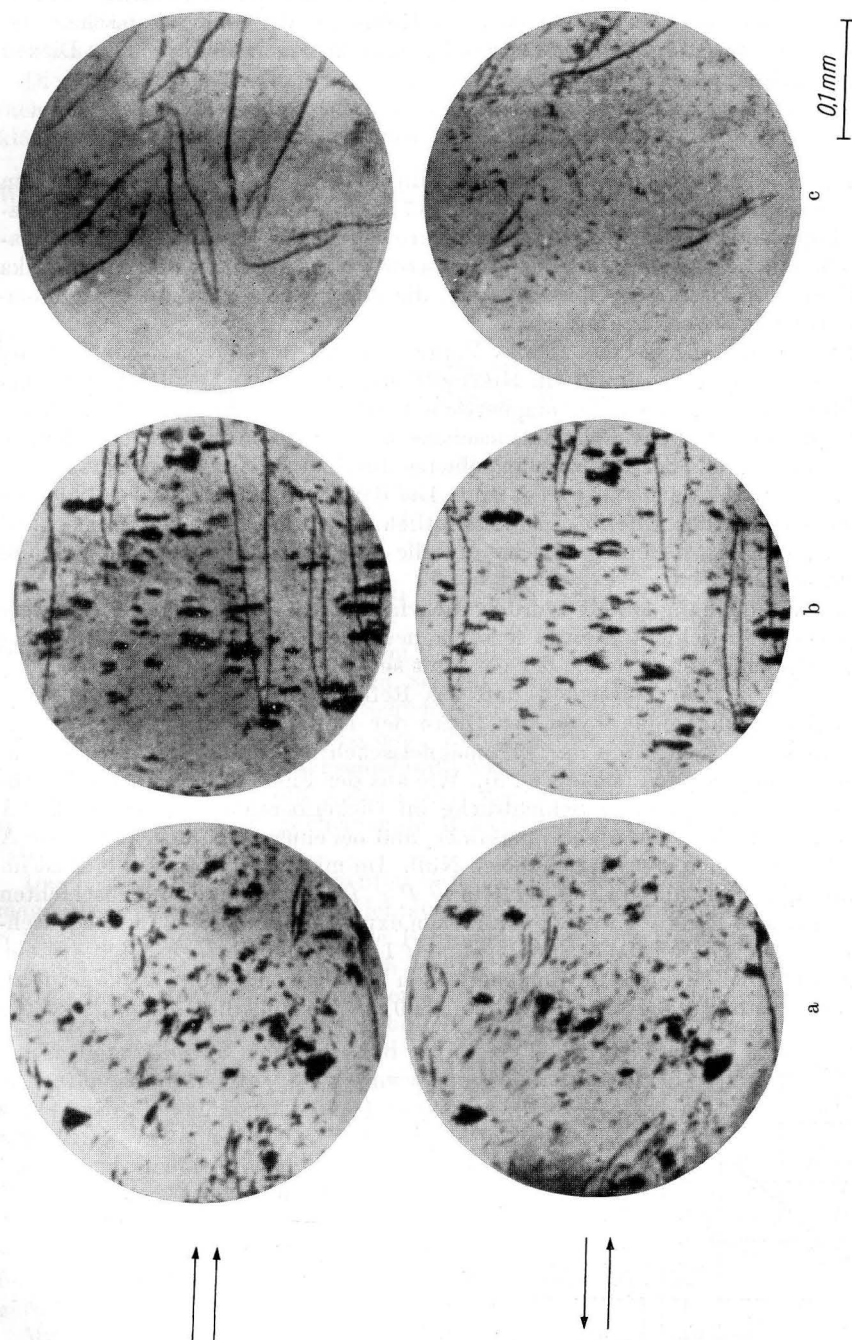


Fig. 5. Ummagnetisierungskerne in der nk-Schicht von 500 Å Dicke bei verschiedener Dicke t_h der hk-Schicht. a) $t_h = 100 \text{ Å}$, b) $t_h = 1200 \text{ Å}$, c) $t_h = 2500 \text{ Å}$

alleler und senkrechter Orientierung der leichten Achsen der Teilschichten durchgeführt wurden, zeigten das Fehlen eines Einflusses der makroskopischen magnetischen Felder auf die Größe von H_c der nk-Schicht, zumindest bis zu Dicken der hk-Schicht von 1000 bis 1200 Å.

5. Mikrowelleneigenschaften von Mehrfachschichten

Durch früher durchgeführte Untersuchungen der Mikrowelleneigenschaften von ferromagnetischen Einfachschichten [17] wurde festgestellt, daß in schwachen Magnetfeldern die Änderung der Mikrowellenssuszeptibilität von ferromagnetischen Schichten im Vergleich zu massiven polykristallinen Ferrodielektrika eine Reihe von Besonderheiten aufweist, die durch den Charakter des Ummagnetisierungsprozesses bedingt sind.

Dünne Schichten, die ein kleines Volumen eines ferromagnetischen Stoffes haben, reagieren schwach auf ein Mikrowellen-Magnetfeld. Das letztere bedeutet, daß solche Effekte wie die magnetische Steuerung der Frequenz eines Resonators, die Drehung der Polarisationssebene bei der Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle des Mikrowellengebietes durch eine Schicht, die Phasenverschiebung usw. schwach ausgeprägt sind. Die Benutzung von dickeren Schichten zur Verstärkung des Effektes ist bekanntlich durch die Tiefe der Skinschicht begrenzt, die für ferromagnetische Metalle im Mikrowellenbereich 10^{-4} bis 10^{-5} cm beträgt.

Im Zusammenhang damit wurden Mehrfachschichten untersucht, die eine Gesamtheit von Schichten eines ferromagnetischen Metalls darstellen, welche durch SiO_2 -Schichten voneinander getrennt sind.

Es wurde die Durchlässigkeit und das Reflexionsvermögen (bezüglich der Leistung) in Abhängigkeit von der Dicke der Einfachschichten und von der Gesamtdicke der Schichten des ferromagnetischen Metalls in einem Mehrfachschichtsystem gemessen (siehe Fig. 6). Wie aus der Figur folgt, fällt die Durchlässigkeit bei zunehmender Schichtdicke im Dickenbereich von 100 bis 300 Å stark ab. Danach ist ihr Abfall langsamer, und bei einer Schichtdicke von 10^4 Å ist die Durchlässigkeit praktisch gleich Null. Im mittleren Teil der Figur ist im vergrößerten Maßstab ein Teil der Kurve $P = f(d)$ für dicke Einfachschichten gezeichnet. Die Punkte 1 und 2 entsprechen experimentellen Werten der Durchlässigkeit für zwei Mehrfachschichtsysteme: 1 für ein Mehrfachschichtsystem, das aus 10 Schichten eines ferromagnetischen Metalls von 1000 Å Dicke besteht, 2 für ein System aus 40 Schichten von 500 Å. Obwohl die Gesamtdicke der

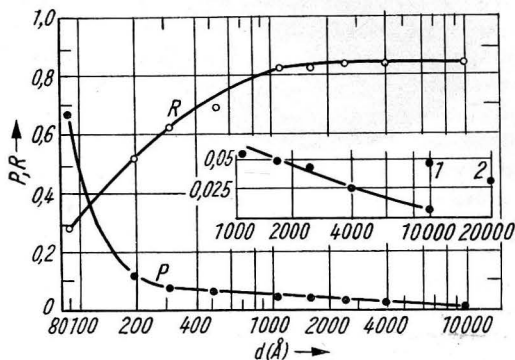


Fig. 6. Abhängigkeit der Durchlässigkeit P und des Reflexionsvermögens R von der Schichtdicke

Schichten des ferromagnetischen Metalls im ersten Fall 10^4 \AA und im zweiten $2 \times 10^4 \text{ \AA}$ ist, sind die Durchlässigkeiten für die Mehrfachschichtsysteme wesentlich größer als die Durchlässigkeit für eine Einfachschicht von 10^4 \AA Dicke.

Die Besonderheiten beim Durchgang von Mikrowellenenergie durch Mehrfachschichtsysteme können im Rahmen der gewöhnlichen Elektrodynamik erklärt werden.

Durch eine einfache Rechnung wurde für eine Schicht der Dicke d folgender Wert der Durchlässigkeit (bezüglich der Leistung) erhalten:

$$P = \frac{2(k\delta)^2}{\sinh^2\left(\frac{d}{\delta}\right) + \sin^2\left(\frac{d}{\delta}\right) + k\delta \left[\sinh 2\left(\frac{d}{\delta}\right) + \sin 2\left(\frac{d}{\delta}\right) \right]}. \quad (1)$$

Dabei ist δ die Tiefe der Skinschicht, $k = \omega/c$, ω die Frequenz des elektromagnetischen Feldes, c die Lichtgeschwindigkeit.

Für eine Doppelschicht, deren Gesamtdicke ebenfalls gleich d ist, ist die effektive Durchlässigkeit P_{eff} gleich

$$P_{\text{eff}} = \frac{2(k\delta)^2}{\sinh^2\left(\frac{d}{\delta}\right) + \sin^2\left(\frac{d}{\delta}\right) + k\delta \left[\sinh 2\left(\frac{d}{\delta}\right) + \sin 2\left(\frac{d}{\delta}\right) - \Delta \right]}. \quad (2)$$

Dabei ist

$$\Delta = \left[\sinh\left(\frac{d}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{d}{\delta}\right) \right] \left[\cosh\left(\frac{d}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{d}{\delta}\right) \right]. \quad (3)$$

Weil immer $\Delta > 0$ ist, folgt aus dem Vergleich von (1) und (2), daß $P_{\text{eff}} > P$ ist, d. h., die Aufteilung einer dicken Schicht eines ferromagnetischen Metalls in dünnere, voneinander isolierte Schichten fördert das bessere Eindringen eines Mikrowellenfeldes und führt zu einer Zunahme der effektiven Tiefe der Skinschicht des ganzen Mehrfachschichtsystems. Das bedeutet, daß das Volumen des ferromagnetischen Stoffes, der an der Wechselwirkung mit dem Mikrowellenfeld beteiligt ist, (und folglich auch die Reaktion der Probe auf dieses Feld) ebenfalls vergrößert wird.

Das letztere wurde experimentell bestätigt. Es wurde der Einfluß der Ummagnetisierung von Mehrfachschichtsystemen auf die Parameter eines Hohlraumresonators untersucht. Wenn die Bedingungen für die Drehung des Magnetisierungsvektors eingehalten werden (siehe z. B. [17]), dann führt die Ummagnetisierung eines Mehrfachschichtsystems, das man in den Strombauch des Mikrowellenfeldes eines Resonators gebracht hat, zu einer Änderung seiner Güte (unter dem Einfluß von χ'') und zu einer Verschiebung der Eigenfrequenz (unter dem Einfluß von χ'). In schwachen Magnetfeldern ($H_0 \ll 4\pi M_0$), die weit weg von der ferromagnetischen Resonanz sind, zeigt aber eine theoretische Abschätzung, daß $\chi'' \ll \chi'$ ist. Deshalb kann man annehmen, daß in schwachen Magnetfeldern ein Mehrfachschichtsystem im wesentlichen einen Einfluß auf die Änderung der Eigenfrequenz des Resonators ausüben wird. In Fig. 7 sind die Abhängigkeiten der Verschiebung der Resonanzfrequenz (in relativen Einheiten) von der Dicke der Einfachschichten (Kurve 1) und von der Gesamtdicke der ferromagnetischen Metallschichten im Mehrfachschichtsystem (Kurve 2) aufgetragen.

Mit zunehmender Dicke der Einfachschichten wächst die Phasenverschiebung anfangs linear; dann wird das Anwachsen schwächer, und bei einer Schichtdicke von 10000 \AA beobachtet man eine Tendenz zur Sättigung. Das letztere ist

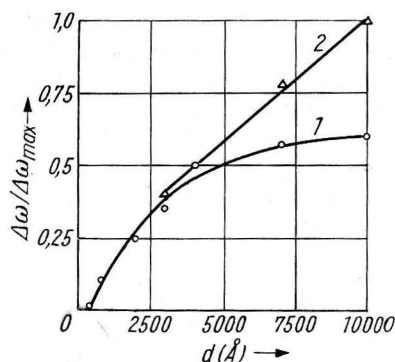


Fig. 7. Abhängigkeit der relativen Verschiebung der Eigenfrequenz des Resonators von der Dicke der Einzelschichten (Kurve 1) und von der Gesamtdicke der ferromagnetischen Schichten im Mehrschichtsystem (Kurve 2)

dadurch bedingt, daß an der Wechselwirkung mit dem Mikrowellenfeld nur die Oberfläche der Schicht beteiligt ist, und eine weitere Dickenzunahme wirkt sich nur unwesentlich auf die Änderung der Resonatorfrequenz aus. Für Mehrschichtsysteme, in denen die Gesamtdicke der Schichten gleich der Dicke einer entsprechenden Einzelschicht ist, ist die Frequenzverschiebung immer größer als für die Einzelschichten (Kurve 2), und sie wächst mit der Zahl der Schichten linear an. Messungen zeigten, daß die Linearität in jedem Falle bis zu einer Gesamtdicke von 30 000 Å (30 Schichten zu 1000 Å) erhalten bleibt.

Das letztere besagt, daß für die untersuchten Mehrschichtsysteme die effektive Tiefe der Skinschicht die Gesamtdicke der Schichten übersteigt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung gestatten es also zu behaupten, daß Mehrschichtsysteme hinsichtlich ihrer Mikrowelleneigenschaften in schwachen Magnetfeldern deshalb einen wichtigen Vorteil gegenüber den Einzelschichten besitzen, weil sie auf ein Mikrowellenfeld eine stärkere Reaktion zeigen. Gleichzeitig bleiben die wesentlichen Eigenschaften, die für die Einzelschichten charakteristisch sind, erhalten: schnelle Wirkung, Abhängigkeit der Änderung der Mikrowellenssuszeptibilität vom Charakter des Ummagnetisierungsprozesses usw. Man kann hoffen, daß die Vervollkommnung der Herstellungstechnologie von Mehrschichtsystemen, die auf einer Automatisierung der Aufdampfprozesse beruht, es erlaubt, Mehrschichtsysteme mit homogenen magnetischen und Mikrowellencharakteristiken zu erhalten.

6. Zusammenfassung

1. Mehrschichtsysteme besitzen eine Reihe von spezifischen Eigenschaften: eine größere Zahl von magnetisch stabilen Zuständen, kleinere Werte der Koerzitivkräfte und deren größere Stabilität.

2. Bei der Herstellung von Mehrschichtsystemen haben lokale Streufelder, die an Inhomogenitäten der einzelnen Schichten entstehen, einen wesentlichen Einfluß auf ihre magnetischen Eigenschaften.

3. Es wurde gezeigt, daß das eigenartige Verhalten der Mehrschichtsysteme bei einer Dicke der hochkoerzitiven Schicht von weniger als 1200 Å im wesentlichen durch lokale Streufelder bestimmt ist. Bei größeren Dicken beginnt die makroskopische Wechselwirkung der einzelnen Schichten wirksam zu werden.

4. Es wurden einige Mikrowelleneigenschaften von Mehrschichtsystemen untersucht. Dabei wurden ihre wichtigen Vorzüge gegenüber den Einzelschichten aufgezeigt.

Literatur

- [1] L. NÉEL, C. R. Acad. Sci. (France), **255**, 1545 (1962).
- [2] L. NÉEL, C. R. Acad. Sci. (France) **255**, 1657 (1962).
- [3] A. KOLK, L. DOUGLAS und G. SCHRADER, J. appl. Phys. **33**, 1061 (1962).
- [4] J. PUCHALSKA und R. SPAIN, C. R. Acad. Sci. (France) **254**, 53 (1962).
- [5] H. FULLER und L. LAKIN, J. appl. Phys. **34**, 1069 (1963).
- [6] H. FULLER und D. SULLIVAN, J. appl. Phys. **33**, 1063 (1962).
- [7] D. CHIN und A. MORRISH, J. appl. Phys. **33**, 1146 (1962).
- [8] H. CHANG, A. YELON und O. VOEGELI, J. appl. Phys. **34**, 1209 (1963).
- [9] J. SUITS und E. PUGH, J. appl. Phys. **33**, 1057 (1962).
- [10] L. OAKLAND und T. ROSSING, J. appl. Phys. **30**, 54 (1959).
- [11] G. BESTLER und A. WICKS, Electronics **17**, 41 (1962).
- [12] K. BROADBENT, Proc. IRE **10**, 1728 (1960).
- [13] L. V. KIRENSKII und N. S. CHISTYAKOV, Dokl. Akad. Nauk SSSR **165**, 87 (1965).
- [14] L. V. KIRENSKII und N. S. CHISTYKAOV, Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. fiz. **30**, 68 (1966).
- [15] N. M. SALANSKI, Dissertation Phys. Inst. d. Sibir. Abteilung d. Akad. d. Wiss. d. UdSSR, 1964.
- [16] N. M. SALANSKII, A. M. RODICHEV und V. A. BURAVIKHIN, Fiz. Metallov i Metallovedenie **11**, 843 (1961).
- [17] N. S. CHISTYAKOV und V. A. IGNACHENKO, Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. fiz. **30**, 59 (1966).
- [18] K. BEHRNDT und F. MADDOCKS, J. appl. Phys. **30**, 5276 (1959).
- [19] L. NÉEL, C. R. Acad. Sci. (France) **241**, 533 (1955).
- [20] C. TILLER und G. CLARK, Phys. Rev. **110**, 583 (1958).

(Received May 31, 1966)