

氏 名	うえ はら やす お 上 原 康 男
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和39年9月16日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和27年3月 東北大学理学部卒業

学位論文題目	電着パーマロイ薄膜の磁気特性に関する研究
--------	----------------------

論文審査委員	東北大学教授	大 泉 充 郎
	東北大学教授	喜 安 善 市
	東北大学教授	森 岡 進
	東北大学教授	菊 地 正
	東北大学教授	金 子 秀 夫
	東北大学教授	白 川 勇 記

論文内容要旨

第 1 章 序 論

1955年に、M. B. Blois によつて磁界中で蒸着したパーマロイ薄膜が単軸磁気異方性をもつこと、また、R. L. Conger によつて膜内の磁化が単一磁区として高速度で回転することが発見された。以来、塊状磁性体に見られない薄膜特有の興味ある磁気特性のため、また電子計算機の超高速開閉素子としての応用に注目され、パーマロイ薄膜に関する研究は基礎および応用の両面にわたり急速に進展してきた。パーマロイ薄膜を記憶素子として応用する試みは、これまで種々行なわれ、Raffel, Bittmann および Bradley の方法などが発表されている。このようにパーマロイ薄膜を開閉素子として使用しようとする場合、薄膜の生成方法と磁気特性との関係および薄膜の基本的な磁氣的諸特性を、充分に明らかにしておくことが必要である。

パーマロイ薄膜の生成方法は、Ni-Fe 合金を真空中でガラス、マイカなどの絶縁物基台上に蒸着する真空蒸着法、電気化学的に導体上に電着（鍍金）する電着法およびガスイオンを陰極（Ni-Fe 合金）に衝突させ Ni-Fe をたたきだして陽極基台面上にスパッタするカソードスパッタ法の 3 つに大別される。このうち真空蒸着法と電着法、なかでも蒸着パーマロイ薄膜に関する研究がこれまでもつとも広く行なわれてきた。

1958年に D. O. Smith や C. D. Olson と A. V. Pohm は、蒸着パーマロイ薄膜の静的および動的磁気特性が Landau-Lifshitz の運動方程式によつて記述されることを理論および実験の両面より明らかにした。以来蒸着パーマロイ薄膜に関する研究は急速に進み、薄膜の生成方法、生成条件と磁気特性、静的磁気特性、磁区構造、スイッチング特性さらには応用に関する研究など、これまで広範囲にわたつて多くの研究結果が発表されている。なかでも Cross-tie 磁壁の発見および入射角効果の発見など特筆すべき研究で、さらには $1 \mu\text{sec}$ の高速スイッチングの観測など、蒸着パーマロイ薄膜に関してはその磁気特性は大分明らかになつている。

一方、パーマロイ薄膜を最初に電着法で生成したのは、1956年 I. W. Wolf で、電着浴として硫酸塩浴が使用された。それ以来 2.3 年間は電着薄膜に関する研究発表はみられず、1959年になつて J. C. Lloyd が銅基板上に電着した 80Ni-20Fe 薄膜の磁気特性を膜厚の関数として研究している。本研究をとり上げたのは、1960年、すなわちこのような研究初期の頃で、電着パーマロイ薄膜の生成方法や磁気特性などほとんどわかつていなかった。1960年以後次第に電着薄膜に関する報告が現われるようになったが、これまでの報告の数も蒸着薄膜に比べてはるかに少ない状態で、電着パーマロイ薄膜の生成条件と磁気特性との関係ならびにその磁氣的諸特性についても不明な点が多い。もつとも重要なスイッチング特性についても、これまでの $10 \mu\text{sec}$ のスイッチング時間が観測されているのみで、蒸着薄膜にみられるような早いスイ

テングが電着薄膜で可能であるかどうか不明になつていない。またこれまでの電着薄膜に関する報告では、個々の項目についてだけの報告が多く、生成方法からスイッチング特性にわたる総合的な研究は行なわれていない。

本研究はこのような背景のもとに行なわれたものであり、本論文では電着パーマロイ薄膜の生成方法から始めて、静的磁気履歴特性、磁区構造、高周波領域における磁気特性、さらにはパルス磁界による高速スイッチング特性に及ぶまでの総合的に行なつた研究の結果について述べたものである。従来、電着薄膜の磁気特性は蒸着薄膜の磁気特性に比較して劣るものと考えられてきた。そのため、電着パーマロイ薄膜の研究は蒸着薄膜の研究に比べて著しく遅れており、上述のような電子工学的応用面に対して電着薄膜について適正な評価を行なうことは困難な状態にあつた。このようなときに、総合的見地に立つて電着パーマロイ薄膜の研究を行ない、その生成方法ならびに磁氣的諸特性を明らかにし、電子工学的応用面に対して適正な評価を与えることは極めて重要かつ有意義なことと考えられる。

第 2 章 電着パーマロイ薄膜の生成方法とその磁気特性

2.1 緒 言

電着パーマロイ薄膜の磁気特性は膜厚ならびに膜の組成に著しく依存する。そこで本章では、まず電着条件と電流効率との関係、電着条件と膜の組成および磁気特性との関係を示し、どのような条件で電着を行えば良い磁気特性の膜が得られるかを明らかにする。つぎに、このようにして生成した電着パーマロイ薄膜の磁気特性と膜の組成、膜厚および基台表面の状態との関係を明らかにする。

2.2 実験方法

電着に使用した電着浴は硫酸ニッケル ($\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 硫酸第一鉄 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)、硼酸 (H_3BO_3) および塩化アンモニウム (NH_4Cl) 蒸溜水に溶解した硫酸塩溶液である。硼酸は PH の緩衝用として、また塩化アンモニウムは電気電導性を向上させるために添加したものである。電着槽は普通 200cc ビーカーを使用し、陰極には被電着基台を、また陽極には炭素棒または 80 Ni パーマロイ板を使用した。陰極は厚さ 0.2 mm、大きさ 6×50 mm の銅板で、片面のみ 2cm² の大きさに電着する。基板の表面は電着前にあらかじめ研摩する。普通は、フェルト車の上で研摩剤 (トリポリ) を用いて一定方向に研摩したものである。

得られた試料は 50 C/S 交番磁界中で磁気履歴曲線をえがかせ、それより抗磁力 H_c 、角形比 Br/Bs および飽和磁束 Φ を測定した。その際、磁界の適用方法は基板の研摩方向と一致する方向である。

2.3 実験結果の概要および結言

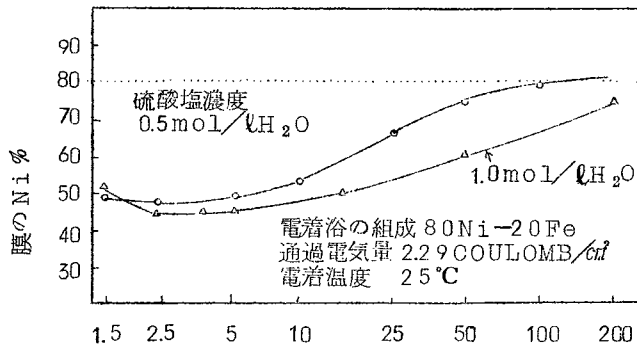
電着パーマロイ薄膜の生成方法ならびに静的磁気特性に関して、主として以下に述べるような新しい事実を見出すことができた。

(1) 電着電流効率

電流効率は電流密度，浴の硫酸塩濃度，電着温度，浴のかく拌，PH および添加剤（ NH_4Cl ）の量などに関係する。一般に，電流効率は電流密度の減少，硫酸塩濃度の増加，電着温度の増加， NH_4Cl の添加および浴をかく拌することによつて増加する。しかし，電着温度が35～50℃以上になると電流効率は却つて減少する。この限界温度は，硫酸塩濃度および電流密度の大きくなるほど高くなる傾向がある。とくに重要なことは，電流効率が著しく低下するPHの限界値が2.5以下および6.0以上に存在することである。

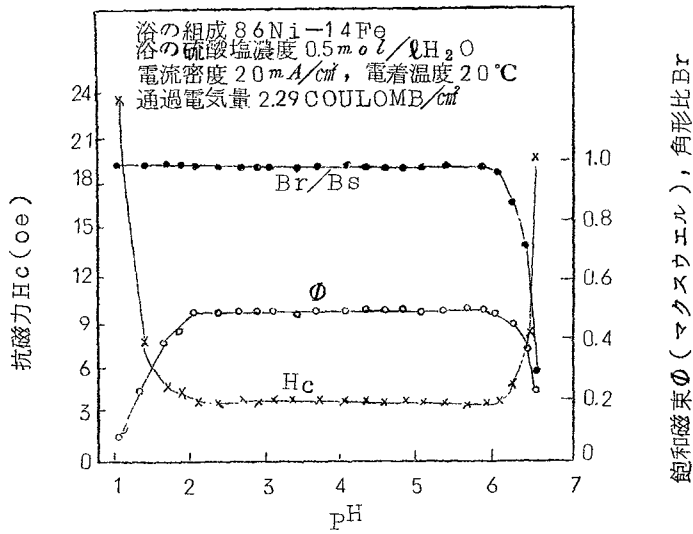
(2) 電着条件と膜の組成および磁気特性との関係

一般に，電着によつて析出したNi-Fe合金の組成は電着浴の組成に対してShiftする。電着膜内のNiの量は浴の金属イオン濃度の増加，電着温度の増加および浴のかく拌によつて減少し，一方，約 4 mA/cm^2 より電流密度の増加または減少とともに増加する。したがつて，高電流密度（数 10 mA/cm^2 以上）および低電流密度（ 1.5 mA/cm^2 以下）のところで，膜の組成と浴の組成とが全く一致するいわゆるzero shiftの電着条件が存在することがわかる（第2-1図）。



第2-1図 浴の硫酸塩濃度および電着電流密度の膜の組成に与える影響

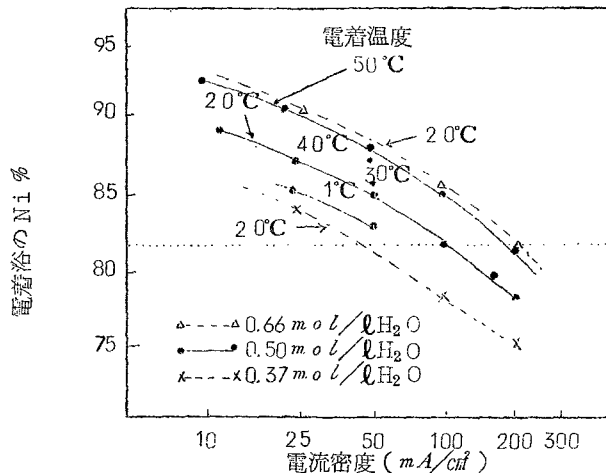
浴の硫酸塩濃度 $0.37\sim 0.66\text{ mol/L H}_2\text{O}$ ，電着温度常温～50℃ および電流密度 $10\sim 200\text{ mA/cm}^2$ 電着条件で生成した同一組成同一膜厚のパーマロイ薄膜では，磁気特性に大きな差異はない。また，浴のPHは4.0～2.5の間で電着を行なえば膜の磁気特性は不変である。磁気特性が大きく変化するPHの限界値が2.5以下および6.0以上に存在する。このPHの限界値（2.5）は，電流密度の増加とともに小さくなり， 3 mA/cm^2 で約2.5であるが 200 mA/cm^2 では約1.5となる（第2-2図）。



第2-2図 pHの磁気特性に与える影響

(3) 抗磁力極小のNi-Fe膜を得るための電着条件

(5)に示されるように、Ni-Fe合金薄膜の磁気履歴特性は膜の組成に強く依存し、膜厚が一定ならば81.5%Ni付近で抗磁力は極小を示す。磁性薄膜の応用上この付近の組成の膜がとくに重要である。電着浴の組成を適当に選定し、電着条件を制御することによつて、希望のNi-Fe成分の膜を電着することが可能となる。膜厚が2000~10000Åのある一定値で電着を行なう場合、抗磁力Hcが極小となる組成(ほぼ81.5Ni-18.5Fe)の膜を得るための電着浴の組成、浴の硫酸塩濃度、電流密度および電着温度間の関係を第2-3図に示す。すなわち図で、抗磁力極



第2-3図 抗磁力が極小を示す組成の膜を得るための電着条件
 各曲線の右端の電流密度は、きれいな光沢ある電着面が得られる限界の電流密度を示す。

小の膜は実験曲線上の各点の示す電着条件で与えられる。これより、電流密度を制御することによつて、抗磁力極小付近の希望の組成の膜を電着することが可能となる。またこれらの実験曲線は次式で示すことができる。

$$5.8(\log 10 i)^2 - 10.5(\log 10 i) - 0.10t - 20.0C + A - 71.3 = 0$$

ここに A : 電着浴中のNi濃度 (%)

C : 電着浴の硫酸塩濃度 (mol/l H₂O)

i : 電着電流密度 (mA/cm²)

t : 電着温度 (°C)

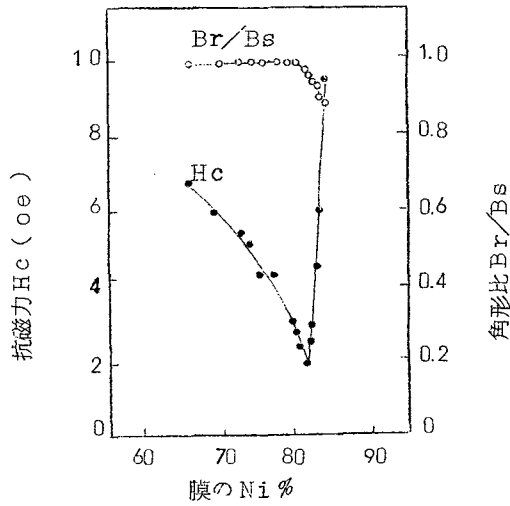
で、その範囲は $75\% \leq A \leq 93\%$, $0.37 \text{ mol/l H}_2\text{O} \leq C \leq 0.66 \text{ mol/l H}_2\text{O}$, $10 \text{ mA/cm}^2 \leq i \leq 200 \text{ mA/cm}^2$ および $1^\circ\text{C} \leq t \leq 50^\circ\text{C}$ である。電着が短時間で行なわれる場合には電着時間によつて膜の組成が変わり、時間が短くなるとともに膜中のFeが増える傾向を示した。したがつて、電着時間が1μ秒以下に短くなり易い 100 mA/cm^2 以上の電流密度では、厳密に組成を制御することには困難が伴う。

(4) 基板表面の磁気特性に与える影響

電着パーマロイ薄膜の抗磁力H_cは、蒸着薄膜の場合と同様に基板表面の平滑なほど小さくなる。ごく平滑な基板(たとえばカバーガラスに非磁性金属を蒸着した基板)では 4200 \AA , 80Ni-20Fe電着膜で 1.0 Oe 以下となり、蒸着薄膜の抗磁力に近い値となる。さらに下地銅基板のgrain structureが現われない 400°C 以下の適当な温度での熱処理でH_cが20~30%減少することを見出した。適当な温度での熱処理はH_cを下げるのに有効と思われる。基板の研磨方向に磁化容易軸が生ずるというLloydらの報告を確認したが、本研究ではさらに、第5章に述べる高速スイッチング測定装置を用いて電着パーマロイ薄膜の膜内各部分における異方性の分布を調べた。その結果、研磨溝に沿つて磁化容易軸の分散が生じていることがわかつた。このほか、各種表面の基板を用いた場合の膜内各部の異方性の分布を検討した。研磨溝のない平滑な基板を使用した場合には、蒸着膜と同様に、磁界中電着によつてその方向に磁化容易軸を生じさせることも可能である。

(5) 膜組成と磁気特性との関係

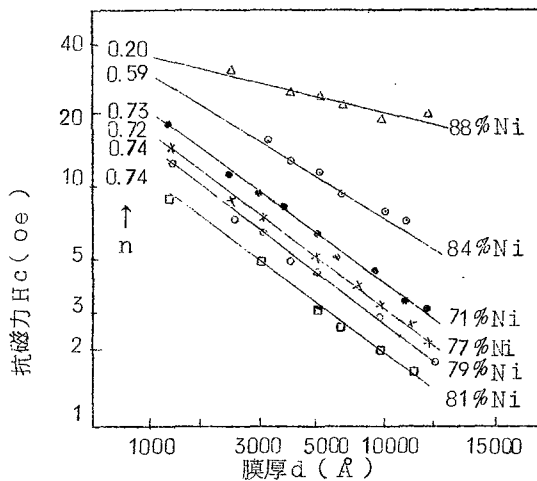
抗磁力極小の電着パーマロイ薄膜の組成はほぼ81.5Ni-18.5Feで、その組成よりFe richな膜では、基板表面の研磨溝の方向に磁界を適用して測定した履歴曲線の角形比はほとんど1に近いが、Ni richな膜では次第に1より低下してくるなど、両者の膜では磁気特性が著しく相違する(第2-4図)。これはH_cが極小の組成で磁わい常数λが零となり、それよりNi richならびにFe richな膜ではλの符号が正負相反することに起因する磁気弾性的な異方性の相違によるものであることが、第3章の実験結果とも合せて明らかとなつた。また、銅基板上に電着した膜ではNi-Fe組成に対するH_cの変化は激しいが、ガラス板上の非磁性金属蒸着膜上に電着した場合にはかなり平坦になり、蒸着パーマロイ薄膜の場合の組成対H_cの曲線に近づくことが明らかとなつた。



第2-4図 膜の組成と抗磁力および角形比との関係 (膜厚 5800Å)

(6) 膜厚と抗磁力の関係

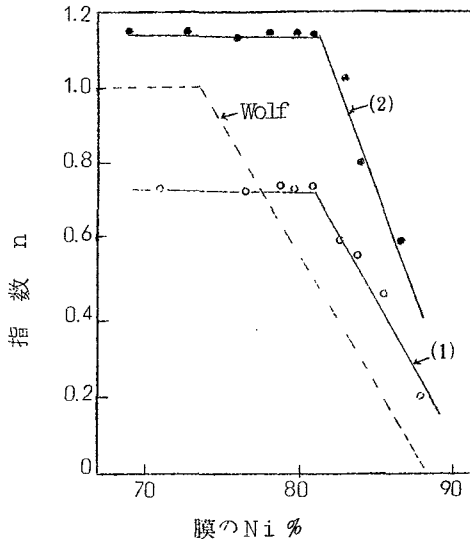
抗磁力 H_c は膜厚 d の指数関数的に変化し、71~88%Ni ではいずれも膜厚の増加とともに $H_c = Ad^{-n}$ ($n > 0$) に従って小さくなる (第2-5図)。この A の値は基板表面が平滑なほど小さくなり、また n の値は、81.5% Ni 付近より Fe rich な側ではほぼ一定値 (0.7~0.8) となるが、Ni rich 側ではしだいに減少する。この n の一定値は、基板表面の研磨溝の大小には無関係であるが、膜の物理的状态が大きく変わることによつて変化する。



第2-5図 Ni-Fe 電着薄膜の抗磁力と膜厚との関係

すなわち，浴にサツカリンを添加して生成することによつて n の値は1.13に変化した

(第2-6図)。



第2-6図 $Hc=Ad^{-n}$ の指数 n と膜の組成との関係
 点線はWolf, 実線は筆者の実験結果を示し,
 (1)は浴にサツカリンを含まず,(2)はサツカリンを浴に添加した場合

第3章 電着パーマロイ薄膜の磁区構造

3.1 緒言

薄膜の磁気特性をより厳密に研究するためには，実際にその磁区模様を目視によつて観察することが重要である。磁性薄膜の磁区模様の観察は，最初1957年にWilliamsとSherwoodによつて蒸着膜について行なわれ，Bitter法を用いて塊状磁性体に見られない各種の興味ある磁区模様が観察された。以来，蒸着薄膜については，各種の磁区模様が明らかにされているが，一方，電着薄膜については，Bitter法による磁区模様の観察はまだ行なわれていない。

前章に述べたように，81.5Niなる膜成分を境としてNi richおよびFe richな電着パーマロイ薄膜では，磁気特性が著しく相違する。本章では，電着パーマロイ薄膜の静的磁気特性の本質を磁区模様の観察結果から明らかにすることを目的とする。すなわち，Bitter法によつて電着パーマロイ薄膜の磁区模様を観察し，磁界を加えた場合および外部stressを加えた場合の磁区模様の変化より，Ni richおよびFe richな膜で磁気特性の相違する原因を解明した。

3.2 試料および観察方法

試料はFe rich(80Ni-20Fe)およびNi rich(82.5Ni-17.5Fe)の膜厚600Åから4200Åの電着薄膜で，トリポリを使用して一方向研磨を行なつた銅基板上に電着されている。

コイル間隙 2.6cm のヘルムホルツコイルの中央に光学顕微鏡を据え、試料をその中心軸上におく。コイルは試料のまわりに 360° 回転可能であり、これによつて電着薄膜に対する交流消磁および膜面に平行な磁界を 0 から 50 Oe まで連続的に変えることが可能である。

3.3 実験結果の概要

Fe rich な膜では、磁壁は基板表面の研磨溝（以下単に溝という）にそつた凹凸におちこんで、溝と区別できない。しかし Striation の傾きから磁化の方向が決定でき、溝に平行な磁界によつて磁壁の移動が起こり、直角方向の磁界によつて磁化の回転が起こることが観察された。この結果は、磁化容易軸が溝と平行に生じていることを示すもので、履歴曲線による静的磁気特性の研究結果と良く一致する。

Ni rich な膜では Fe rich な膜と異なり、その磁壁はある膜では溝と完全に区別されその走る方向は溝に直角であり、他の膜では複雑な磁区模様を示す。また磁壁が溝と平行に走り、あたかも Fe rich な膜と同じような磁区を示す膜もある。磁壁が溝と直角に走る膜に、溝と平行に磁界を加えると磁化の回転が起こり磁壁は消失するが、直角に磁界を加えると磁壁の移動が起こる。また、溝と平行に飽和された後の残留磁化状態では磁壁は現われるが、直角に飽和させた残留磁化状態では現われない。これらの結果より、磁化容易軸は磁壁と直角、すなわちこの場合は溝と直角方向であることがわかる。

Fe rich な膜で溝と平行に tension を与えても磁区模様は現われないが、compression を与えると溝とほぼ直角方向に磁壁の走る磁区模様が出現する。これは compression によつて容易軸が溝と直角方向に 90° 変化したことを示すものである。一方 Ni rich な膜では、磁壁が溝と直角に走る比較的単純な磁区模様を示す膜の場合だけでなく、複雑な磁区模様の場合でも溝と平行に tension を与えると磁壁は直線性を増し、溝と直角に走る。すなわちこの効果は、溝に直角の方向から容易軸の部分的なカタヨリを小さくし、異方性を助長することを示している。溝と平行に compression を与えると磁壁はすべて消え溝と平行に走るようになる。このとき容易軸は溝と平行である。すなわち、Fe rich と Ni rich な膜では外部 stress に対して磁区模様の受ける効果は反対である。外部 stress による磁気履歴曲線の変化の両膜に対する相違は、これらの結果を用いてよく説明することができる。これら電着パーマロイ薄膜で蒸着薄膜によく見られる Cross-tie 磁壁も観察されているが、本要旨には写真は省略する。

3.4 結 言

以上各種磁区模様の観察結果より、Ni rich および Fe rich 両膜の磁気特性の相違は、磁わい常数 λ の符号が正負相反することに起因する磁気弾性的な異方性の相違によるものであることがわかつた。Fe rich は膜では $\lambda > 0$ で、形状異方性 K_d と磁気弾性異方性 K_1 による容易軸はいずれも溝と平行である。しかし Ni rich な膜では、 K_d による容易軸は溝と平行である。しかし Ni rich な膜では、 K_d による容易軸は溝と平行であるが、 $\lambda < 0$ であるた

め K_d による容易方向は溝と直角である。したがって、 $K_d < K_d$ の場合には容易軸は溝と直角でその方向に磁壁が走るが、 $K_d \sim K_d$ では容易方向は部分部分で異なり磁区模様は複雑となり、また $K_d > K_d$ の場合には容易軸は溝と平行になる。Ni rich な膜で、Ni 成分の増加とともに溝の方向の履歴曲線の角形比が 1 よりじだいに低下してくるのはこの理由によるものである。

第 4 章 高周波領域における電着パーマロイ薄膜の磁気特性

4.1 緒 言

超高速スイッチング素子として電着パーマロイ薄膜に着目する場合、高周波領域における磁氣的挙動がとくに重要となる。そこで、この応用的見地からもつとも重要と考えられるバイアス磁界が異方性磁界と直角の場合について、電着パーマロイ薄膜の高周波領域における磁化の挙動を磁化回転模形をもとにして検討する。

いま、直流バイアス磁界を容易軸と直角に加えた場合、磁化 M のもつとも不安定な状態はバイアス磁界が丁度異方性磁界の大きさと等しい場合に起る。このとき磁化の方向は困難軸方向にあるが、付加的な微小磁界でもつとも方向を変え易い状態になつている。すなわち、容易軸方向の微小振巾の交番磁界によつて容易に向きを変え得るような準安定の状態にあるので、この状態で帯磁率が最大となることが予想される。そこで、本章では、この系について理論的計算を行ない、ついでこれを実験的に検証した。すなわち、薄膜の磁化の回転が damping を含んだ運動方程式に従うものとして、膜の複素帯磁率を理論的に求めた。また、細線上に磁界中電着によつて生成した 30 Ni-20 Fe 薄膜を用いて実験的に複素帯磁率を求めた。その結果いずれの場合にも、バイアス磁界が異方性磁界と等しいところで、帯磁率が最大となることが検証できた。また、このような理論的ならびに実験的考察の結果、バイアス磁界を加えながら膜の帯磁率を測定することによつて、異方性磁界の大きさならびにその分布の程度を推定できることを見出した。

4.2 複素帯磁率の理論的計算

(1) 単軸異方性の分布を考えない場合

膜面内に直交する X , Z 軸をとり、それと垂直方向を Y 軸とする。ここで磁化困難軸 (Z 軸) 方向に直流バイアス磁界 H_{dc} を加え、さらに磁化容易軸 (X 軸) 方向に $h_x \infty e^{i\omega t}$ なる微小高周波磁界を加えるものとする。異方性常数 K をもつた薄膜の全エネルギー E は

$$E = KM_z^2/M^2 - (M_x h_x + M_z H_{dc}) + 2\pi M Y^2 \quad (1)$$

で表わされる。ここに第 1. 2. 3 項はそれぞれ異方性エネルギー、外部磁界によるエネルギーおよび反磁界エネルギーである。式(1)で磁化 M の X , Y , Z 成分の変分をとると X , Y , Z 方向の有効磁界 H が計算でき

$$\begin{aligned} H_x &= -2E/2M_x = h_x \\ H_Y &= -2E/2M_Y = -4\pi M_Y \\ H_Z &= -2E/2M_Z = H_{dc} - (2K/M^2)M_Z \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。この有効磁界 H の中で M がつぎの Landau Lifshitz 運動方程式に従って運動しているものとする

$$dM/dt = \gamma [M \cdot H] - \lambda (M - M_0) \quad (3)$$

これを各成分にわけると

$$\begin{aligned} dM_x/dt &= \gamma M_y H_z - \gamma M_z H_y - \lambda (M_x - M_{x0}) \\ dM_y/dt &= \gamma M_z H_x - \gamma M_x H_z - \lambda M_y \\ dM_z/dt &= \gamma M_x H_y - \gamma M_y H_x - \lambda (M_z - M_{z0}) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここに λ は damping constant, γ は gyromagnetic ratio, M_{z0} , M_{x0} は平衡条件から求められる平衡のときの磁化 M_0 の X, Y, Z 成分である。

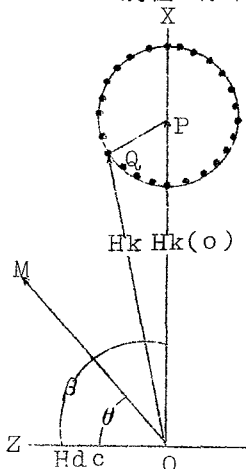
いま h_x を加えることによつて、磁化 M は平衡値 M_0 を中心として $M = M_0 + m = M_0 + m_0 e^{i\omega t}$ で示される微小振動をする。この M , h_x を式(4)に代入して m_x を求めれば、 $m_x = \chi h_x = (\chi - i\chi'') h_x$ より複素帯磁率 χ' , χ'' が求められる。すなわち、

$$\begin{aligned} \chi' &= [M/Hk] \frac{A^2}{B^2 + 1 - A^2} & A < 1 \\ &= [M/Hk] \frac{1 + (A-1)C}{B^2 + (A-1)\{1 + (A-1)C\}} & A \geq 1 \\ \chi'' &= \left[\frac{\lambda(\omega/\gamma)}{2\pi H k^2 \gamma} \right] \frac{A^2}{(B^2 + 1 - A^2)^2} & A < 1 \\ &= \left[\frac{\lambda(\omega/\gamma)}{2\pi H k^2 \gamma} \right] \frac{1 + (A-1)C}{[B^2 + (A-1)\{1 + (A-1)C\}]^2} & A \geq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ここに $A = Hd c / Hk$, $B^2 = \lambda^2 / 4\pi M H k^2 \gamma^2$, $C = Hk / 4\pi M$ である。

(2) 単軸異方性の分布を考えた場合

一般に、磁化容易軸の分布の全く無い磁性薄膜を生成することは難しく、膜内各部において容易軸は平均方向からずれているのが普通である。したがつて、異方性の分布を考慮に入れて複素帯磁率を計算した方が、より実際に近い結果が得られるものと考えられる。そこで第4-1図に示したような異方性の分布を仮定すると、式(1)を式(6)によつて置きかえることができる。



第4-1図 薄膜内の異方性磁界の分布仮定図

\vec{OP} は平均の異方性磁界 $Hk(0)$, \vec{PQ} は部分的な異方性磁界でその点の有効は異方性磁界が \vec{OQ} である。 β はこれと困難軸とのなす角である。複素帯磁率は黒丸上の各点について計算される。

$$E = K \sin^2(\theta - \beta) - (M_x h_x + M_z H d c) + 2\pi M \gamma^2 \quad (6)$$

前の場合と同様にして解くと

$$\begin{aligned} \chi'_{\beta} &= M \cos^2 \theta \sin \theta_0 / H k \{ B^2 \sin \theta_0 - \cos \theta_0 (\cos^2 \theta_0 - 3/2) \} \\ &\quad \sin 2\beta - \sin^3 \theta_0 \cos 2\beta \} \\ \chi''_{\beta} &= (\lambda / \gamma) (\omega / \gamma) \cos^2 \theta_0 \sin \theta_0 / 2\pi H k^2 \{ B^2 \sin \theta_0 - \cos \theta_0 \} \\ &\quad (\cos^2 \theta_0 - 3/2) \sin 2\beta - \sin^3 \theta_0 \cos 2\beta \}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

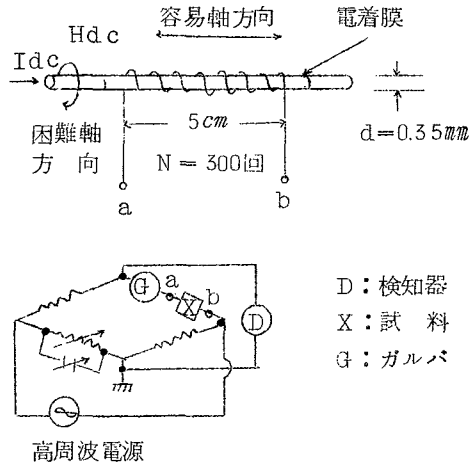
となり、この平衡位置 θ_0 を決める平衡条件式は

$$M \sin \theta_0 [H d c + H k \{ \cos \theta_0 \cos 2\beta - \cos 2\theta_0 \sin 2\beta / 2 \sin \theta_0 \}] = 0 \quad (8)$$

で与えられる。

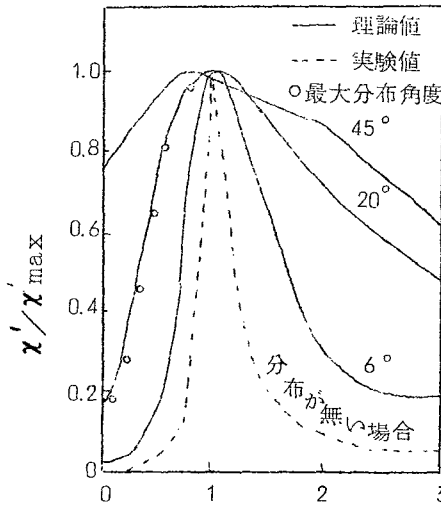
4.3 実験より求めた複素帯磁率

帯磁率の測定のための試料と測定装置を第4-2図に示す。試料は、100 Oe 以上の直流磁界を加えながら電着することによつて、非磁性金属細線の軸方向に磁化容易軸を生じさせた80 Ni-20 Fe 電着膜である。インピーダンスの測定にはマックスウェルブリッジを使用し、測定周波数は1~5 Mcpsでその磁界の大きさは0.08 Oeに保つた。



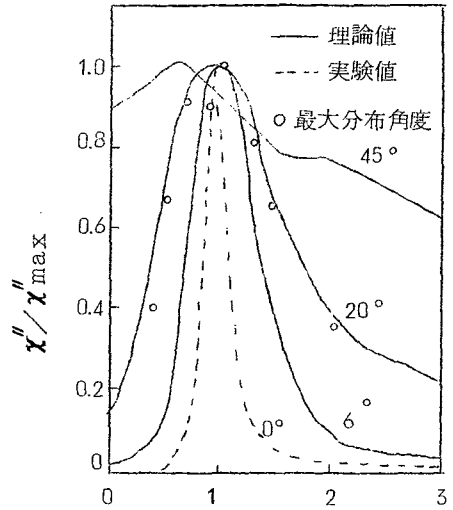
第4-2図 試料ならびに測定装置

第4-3図および第4-4図は χ' , χ'' の理論計算 ($B=0.3$ として) の結果, および測定結果 ($\omega = 3MC$ の場合, 測定値は $\chi'_{max} = 690$, $\chi''_{max} = 35$) を同時に図示したものである。



A

第4-3図 A ($=Hdc/Hk(o)$)に対する
複素帯磁率の実数部
 χ'/χ'_{max} の理論曲線



A

第4-4図 Aに対する複素帯磁率の虚数部
 χ''/χ''_{max} の理論曲線

4.4 結 言

以上、薄膜の磁化ベクトルがLandau-Lifshitz形の運動方程式に従うものとして、膜の複素帯磁率を理論的に計算した結果、磁化困難軸方向の直流バイアス磁界の大きさHdcが異方性磁界H_kと等しいところで帯磁率が極大となることを示した。帯磁率の極大の形状は、異方性磁界の分布が全くないものとして計算すると非常に尖鋭となるが、分布を考慮に入れて計算するとその増加とともにしだいに平坦になる。また、分布がない場合には、Hdc = 0で帯磁率は零となるが、分布の増加とともにしだいに大きな有限値をもつようになる。このような理論結果は実験結果と全く良い一致を示した。これらの結果、異方性の分布が小さければ高周波かつ微小振幅で大きいインダクタンスの変化が得られ、パラメトロンとして高周波で有効に動作が可能であることがわかる。また、直流バイアス磁界に対する帯磁率の変化を知れば、異方性磁界の大きさおよびその分布の程度を推定できることが明らかとなった。

第5章 電着パーマロイ薄膜のスイッチング特性

5.1 緒 言

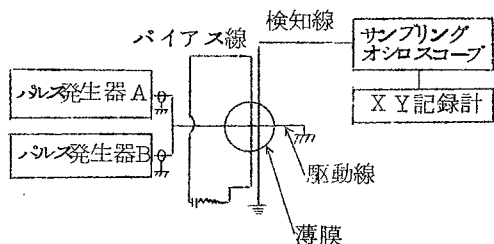
パーマロイ薄膜を超高速度開閉素子として使用しようとする場合、パルス磁界中での磁氣的挙動がとくに重要となる。蒸着パーマロイ薄膜については、すでにDietrichによつて700~

3000 Å の 80 Ni - 20 Fe 蒸着膜について $1 \mu\text{sec}$ のスイッチング時間が観測され、そのスイッチング特性も大分明らかとなっている。一方、電着パーマロイ薄膜ではこれまでに 10 数 μsec のスイッチング時間が観測されているのみで、そのスイッチング特性もほとんど明らかにされておらず、また蒸着膜のように早いスイッチングが可能であるかどうかも明らかとなっていない。しかもこれまでの研究は、すべて細線上に電着した円筒状薄膜に関するものであつた。本章では、平板状の銅基台に電着した 80 Ni パーマロイ電着薄膜のスイッチング特性について述べる。

5.2 試料および実験方法

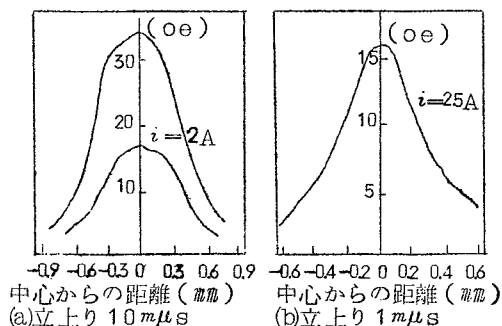
試料は、 0.2mm の銅基板上に電着した膜厚 2100Å から 16800Å 直径 5mm の円板状 80 Ni - 20 Fe 薄膜である。またこれとの比較のために直径 5mm 、 2000Å の厚さの 80 Ni - 20 Fe 蒸着膜の試料も作成した。

測定は不均一磁界による薄膜の磁化の部分スイッチングを検出する方法で行なつた。これは、実際に薄膜を記憶または論理素子として使用する場合、均一磁界より不均一磁界で駆動する方がより実用的であるからである。測定装置のブロック図を第 5-1 図に示す。パルス発生器 A は駆動用、同 B はリセット用で、A としては立上り $10 \mu\text{sec}$ と $1 \mu\text{sec}$ の 2 種類のパルスを使用した。



第 5-1 図 スwitching測定装置のブロック図

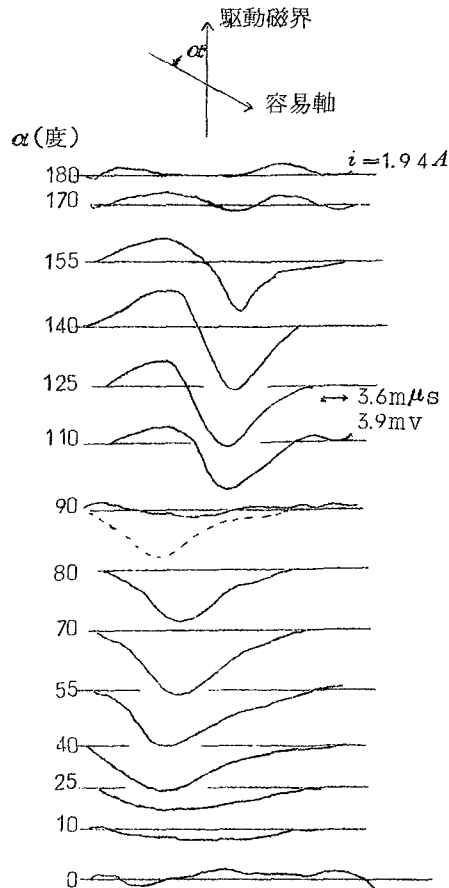
駆動、検知およびバイアスの各線は直径 0.2mm の銅線を使用し、 $1 \mu\text{sec}$ で駆動の場合にはいずれも 1 巻きであるが、 $10 \mu\text{sec}$ の場合には駆動線のみ 3 巻きである。駆動電流によつて膜面の位置に生ずる磁界の分布の概略を第 5-2 図に示した。試料は中心が駆動線と検知線の交点の真下にくるように挿入する。スイッチングの測定中試料を廻転させ、磁化容易軸を駆動磁界と適当な角度をもたせてスイッチングを行なわせる。



第 5-2 図 駆動磁界によつて膜面の位置に生ずる磁界の分布

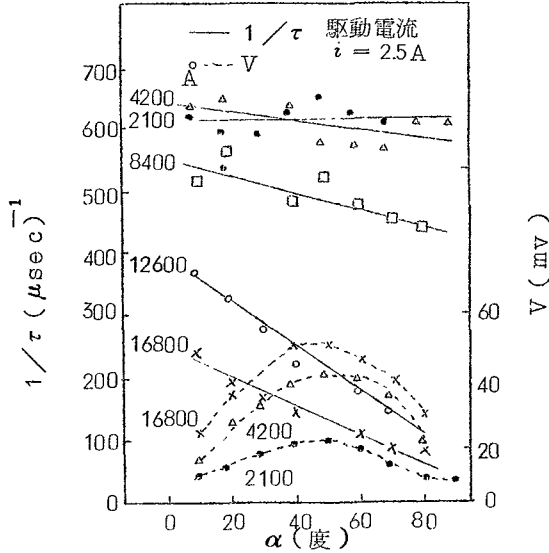
5.3 実験結果の概要

第5-3図は、駆動磁界の方向と磁化容易軸とのなす角 α に対するスイッチング波形の変化を示す。駆動パルスの立上りは $10\mu\text{sec}$ の場合である。 $\alpha < 90^\circ$ のときは1極性の、また $\alpha > 90^\circ$ のときは2極性のスイッチング出力が得られた。 α が 0° 、 90° および 180° では明確なスイッチング波形は現われないが、直流バイアスを加えることによつてスイッチング波形を観測することが可能である。たとえば $\alpha=90^\circ$ の場合、約 40Oe 以上の直流磁界を駆動磁界に垂直に加えることによつて図の点線で示したスイッチング波形が得られ、その方向は直流磁界の向きを逆にすることによつて変えることができた。これらの観測結果は理論的に考えられるスイッチング波形と全く一致し、磁化が 360° の回転を行なつてゐることを証明となる。駆動パルスの立上りが $1\mu\text{sec}$ の場合にも同様なことがいえる。このような α に対するスイッチング波形の測定を他の膜厚についても行ない、 α とスイッチング時間の逆数 $1/\tau$ および出力電圧 V を求めることができる。



第5-3図 駆動磁界と磁化容易軸とのなす角 α に対するスイッチング波形の変化、点線は直流バイアスを加えて測定したスイッチング波形を示す(80Ni-20Fe, 2100\AA)

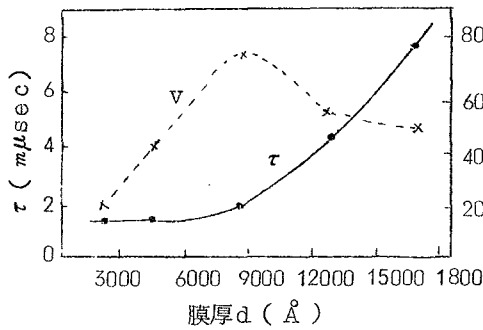
1例として、立上り $1\mu\text{sec}$ の場合の $\alpha \leq 90^\circ$ の場合を第5-4図にあげる。ここで τ とし
ては出力の半値巾に相当する時間を、また V としては出力波形の最高値をとつた。



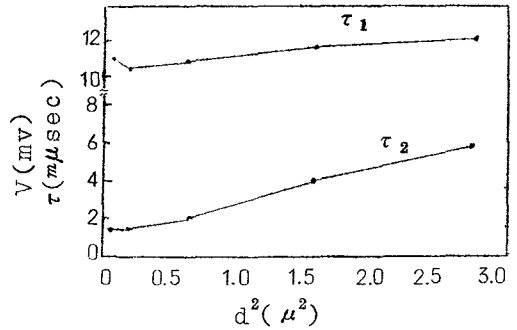
第5-4図 α とスイッチング時間の逆数 $1/\tau$ および出力電圧 V との関係 ($\alpha \leq 90^\circ$)

これらの結果、出力電圧は α が $40^\circ \sim 60^\circ$ および 135° 前後で最大となり、その値はある膜厚まではほぼ膜厚に比例して直線的に増加し $5 \sim 10\text{mV}/1000\text{A}$ であつた。立上り $1\mu\text{sec}$ の駆動で $\alpha = 50^\circ$ の場合、膜厚とスイッチング時間および電圧との関係を示すと第5-5図のとおりである。8200A以上では膜厚の増加とともに出力電圧はかえつて減少する。これは膜が厚くなることによつて磁束が増える効果よりも、スイッチングが遅くなるための効果の方が出力電圧に大きく効いてくるためである。このような現象は渦電流による damping に起因するものである。第5-6図は $\alpha = 50^\circ$ の場合の膜厚の自乗に対するスイッチング時間の関係を図示したもので τ_1 は立上り $10\mu\text{sec}$ τ_2 は $1\mu\text{sec}$ のパルスで駆動した場合である。 τ_1 は16800Aまでの膜厚に対して顕著な変化はみられないが、 τ_2 は7200A付近に限界が存在し、それ以上の膜厚になると膜厚の自乗に対して直線的に増加する。

このほか、駆動磁界の大きさに対するスイッチング波形の変化を調べ、スイッチング係数などを求めた。また、2000Aの蒸着膜についても同様な実験を行ない、そのスイッチング特性が電着膜とほぼ同じであることが確かめられた。



第5-5図 膜厚とスイッチング時間 τ および出力電圧 V との関係



第5-6図 膜厚 d の自乗に対するスイッチング時間の変化 ($\alpha = 5^\circ$)
 τ_1 は $10 m\mu\text{sec}$, τ_2 は $1 m\mu\text{sec}$ の駆動パルスで測定したものである。

5.4 結 言

実験結果を要約するとつぎのとおりである。

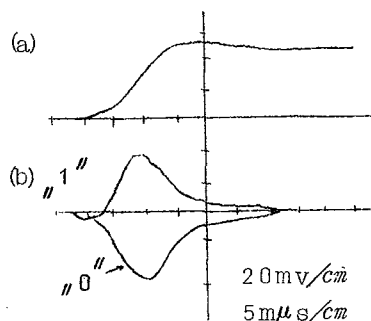
- (1) 金属導体上に電着した薄膜で蒸着薄膜と同様 $m\mu\text{sec}$ の高速スイッチングが可能であり、またスイッチング特性はほぼ蒸着薄膜と同様である。
- (2) スwitchingは駆動パルスの立上り時間の減少とともに速くなり、 $10 m\mu\text{sec}$ ではほぼ $10 m\mu\text{sec}$ の、また $1 m\mu\text{sec}$ ではほぼ $1.6 m\mu\text{sec}$ のスイッチング時間が得られる。
- (3) 膜が厚くなるとスイッチングがしだいに遅くなり、またスイッチング係数も大きくなる。とくに重要なことは、スイッチングの遅れが顕著になる膜厚が存在することである。この限界膜厚はおおむね skin depth と一致する。このような限界膜厚以下ではスイッチング時間は磁化の回転角度によつてあまり影響は受けない。しかしこの膜厚以上になると回転角度の増加とともに遅くなる傾向がある。
- (4) ある立上り時間の駆動パルスに対して、出力電圧が充分とれかつスイッチング時間も小さいような有効膜厚が存在し、限界膜厚とほぼ一致する。その膜厚は、磁化の回転が 90° 以内の場合には 76800 \AA 以上 ($10 m\mu\text{sec}$ で駆動) および 7200 \AA 前後 ($1 m\mu\text{sec}$ で駆動) である。

第6章 結 論

本章においては、まずこれまでの各章で得られた結果を要約して述べた。つぎに、電着パーマロイ薄膜の記憶素子としての応用および再現性について実験ならびに考察を加え、最後に蒸着パーマロイ薄膜の特性との比較を行なつた。

第5章に述べたスイッチングの測定方法では、駆動、バイアスおよび検知の各線の配置は記憶素子マトリックスとして磁性薄膜を使用する場合のもつとも基本的かつ一般的な方法と一致する。

すなわち、第5章で述べたスイッチング特性がそのまま記憶素子としての応用の系に適用でき、平板状の電着パーマロイ薄膜が蒸着薄膜と同様に早い読み出し速度をもつた記憶素子として使用可能であることがわかる。さらに本章では、 $2 \times 2 \text{ cm}$ の連続平面状の電着パーマロイ薄膜を 3×3 ピットとして使用する簡単な記憶マトリクス測定装置を作り、上記のことを実際に確かめた。その“1”および“0”情報の読み出し波形の一例を第6-1図に示す。(本論文では写真表示)



第6-1図 駆動パルス波形(a)とスイッチング
波形(b)
($80\text{Ni}-20\text{Fe}$, 15000A 電着膜)

以上のような磁性薄膜の応用を考えた場合、膜の磁気特性の均一性ならびに再現性が重要な問題となる。実験の結果、電着薄膜は蒸着薄膜に比較して良い均一性ならびに再現性を示すことがわかった。一例をあげると、とくに精密研磨を行わない基板に電着した場合でも15 seriesの抗磁力 H_c の平均値からの最大偏差は6.6%、 $2 \times 2 \text{ cm}$ 中の9スポットの最大偏差は5.1%であった。一方蒸着パーマロイ薄膜では、これまで報告されたもののうちもつとも良い値でも、 $2.5 \times 7.5 \text{ cm}$ 中の18スポットで13%その25 series (18スポット中6ヶづつ選んで測定)では33%であった。このほか本章では、電着パーマロイ薄膜と蒸着パーマロイ薄膜の特性の簡単な比較表を作った。

以上本研究では総合的見地に立つて電着パーマロイ薄膜の研究を行ない、生成方法から始め、生成条件と磁気特性の関係、静的磁気特性、磁区構造、高周波領域における磁気特性ならびにパルス磁界による高速スイッチング特性などをほぼ明らかにすることができた。さらに再現性ならびに記憶素子としての応用に対しても考察を加え、また蒸着パーマロイ薄膜との比較を行なった。これらの結果、電着パーマロイ薄膜の磁氣的諸特性が明らかとなり、 $\text{m}\mu\text{s}$ の超高速開閉素子として充分使用可能であることが確かめられたことは、工学的に重要な意義をもつものと考えられる。

審 査 結 果 要 旨

パーマロイ薄膜はそのスイッチング速度の高速性、あるいはその大量生産の可能性などのため電子計算機の開閉素子への応用が極めて有望視され、これに関する研究が世界的にとりあげられ、急速な進展をみている。しかし、これまでの研究は蒸着パーマロイ薄膜の研究が大部分で電着パーマロイ薄膜については従来二、三発表されておるのみで、その電子工学的な応用への適正な評価を行なうことは困難な状態にあつた。本研究はこのような背景のもとに、電着パーマロイ薄膜の生成方法から始めて、静的磁気特性、磁区模様、高周波領域における磁気特性、さらにパルス磁界による高速スイッチング特性に及ぶまで総合的な研究を行なつたものである。本論文はその結果について述べたものであり、電着パーマロイ薄膜の有用性を初めて系統的な手法で明らかにしたものと見える。

本論文は6章よりなる。第1章ではパーマロイ薄膜の従来の研究概要、本研究の意義ならびにその概要について述べている。

第2章においては、電着パーマロイ薄膜の生成方法ならびに膜の静磁気特性を明らかにしている。特に抗磁力が極小となる組成の膜をうるための種々の電着条件を指摘し、さらに膜の組成、膜厚および基台表面の状態に対する静磁気特性の依存性を説明していることは有効な新知見である。

第3章においては、電着パーマロイ薄膜の磁気特性を磁区模様の観察結果から、さらに詳細に検討している。すなわち電着パーマロイ薄膜の磁区模様をBitter法によつて初めて観察することに成功し、磁界を加えた場合および外部より歪力を加えた場合の磁区模様の変化をしらべることにより、組成による磁気特性の変化の原因を見事に説明している。これは工学的に重要な成果である。

第4章においては、高周波磁界中での電着パーマロイ薄膜の磁化の挙動について述べている。すなわち、磁化の運動がLandau-Lifshitz型の運動方程式に従うものとして理論的に帯磁率を計算し、困難軸方向のバイアス磁界の大きさが異方性磁界と等しくなるところで帯磁率が最大となることを見出し、かつ実験的にもこの検証をおこなつている。これらの理論並びに実験の結果は異方性磁界の大きさおよびその分布の程度を知る一つの新しい方法を示したもので、重要な知見を少なからず与えるものである。

第5章においては超高速パルス磁界中での電着パーマロイ薄膜の動的スイッチング特性につい

て述べている。これまで電着パーマロイ薄膜については円筒状薄膜で、10数n secまでのスイッチングが観測されたのみであつたが、本研究では平板状の銅基台上に電着したパーマロイ薄膜で1n sec程度の蒸着膜と同様に速いスイッチングが可能であることを初めて実証している。本章ではこのほかスイッチング時間が短かくかつ出力電圧の大きくとれる、いわゆるスイッチングに対する有効膜厚が存在するという極めて興味ある事実を見出している。これらは実際に電着パーマロイ薄膜を記憶素子として使用する場合に、膜厚に対して重要な指針を与えるものである。

第6章では、第2章から第5章までの結果をとりまとめたほか、電着パーマロイ薄膜の再現性、電着パーマロイ薄膜の記憶素子としての考察を行ない、さらに蒸着パーマロイ薄膜との比較を行なつている。これらの結果、電着パーマロイ薄膜は再現性が優れており、また蒸着膜同様速いスイッチングが可能であることから、超高速の開閉素子として充分使用可能であることが示されている。

以上要するに、本論文は電着パーマロイ薄膜の生成方法ならびに静的および動的特性を明らかにし、さらに電着パーマロイ薄膜が超高速開閉素子として充分使用可能であることを初めて明らかにしたのであつて電気並びに情報処理工学上寄与するところが少なくない。

よつて本論文は、工学博士の学位論文として合格と認める。