

氏 名	中 島 健 太 郎
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 26 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 応 用 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	磁 気 - 光 学 効 果 に よ る Fe, Co, Ni 超 薄 膜 の 電 子 状 態 に 関 す る 研 究
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 宮 崎 照 宣 東 北 大 学 教 授 伊 藤 正 東 北 大 学 教 授 岡 泰 夫 東 北 大 学 助 教 授 山 本 正 樹 東 北 大 学 助 教 授 加 藤 宏 朗

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

近年、強磁性超薄膜と非磁性薄膜とを交互に積層した磁性人工格子が作成され、研究が盛んに行われている。これら磁性人工格子に関する研究を通じて、相関相互作用の振動現象及びそれに付随した巨大磁気抵抗効果、また垂直磁気異方性の出現、磁気光学効果の増大など新たな現象が数多く発見され、基礎的並びに応用上いずれの観点からも強い関心を集めるようになった。磁性人工格子の示す数々の新現象の発現機構には、強磁性体の超薄膜化によるその物性の変化が強く関与していると考えられている。強磁性超薄膜の構造の特異性とその磁性に与える影響を調べるためには、膜の構造を十分に把握しつつその磁気的性質の膜厚依存性を評価することが最適である。このためには、作製した超薄膜の磁性を超高真空中その場で評価する必要がある。本研究では、この条件を満たし、かつ超薄膜の磁性およびその電子状態を評価する上で十分な感度の得られる測定手段として、磁気光学カー効果のエネルギースペクトルの測定に注目した。磁気光学効果は古くから知られた現象であり、その電子論的な起源についても一定の解釈がなされてきている。しかし現在のところ、強磁性超薄膜の磁気光学カー効果スペクトルを、超高真空中その場で測定する試みはまだなされていない。

本研究ではこれらの点をふまえ、超高真空中で強磁性超薄膜の磁気光学カー効果スペクトルをその場で測定できる装置を作製し、強磁性超薄膜の磁気光学効果の測定を通じて、超薄膜の電子状態の変化を系統的に明らかにすることを目的とする。

第 2 章 実験原理

強磁性金属の磁気光学カー効果は、その伝導率テンソルに非対角項が存在することにより生じ、カー回転角、楕円率の大きさは、交流電気伝導率テンソルの対角項 σ_{xx} と非対角項 $\omega\sigma_{xy}$ を含んだ複雑な関数で与えられる。本章では、まず巨視的な電磁気学の理論を用いることにより、バルク及び超薄膜のカー回転角、楕円率の表式を明らかにした。さらに線形応答理論に基づいて、交流電気伝導率の表式を導いた。これらの表式は、第 4 章、第 5 章での議論の際に適用される。

第 3 章 実験装置

本研究では、強磁性超薄膜の表面磁気光学効果および複素屈折率を超高真空中でその場で測定できる装置の開発を行った。図 1 に制作した測定装置の上面図を示す。装置は、超高真空装置と磁気光学効果測定系から構成されている。超高

真空装置は、ゲートバルブで区切られた成膜室と測定室からなり、マニピュレータで、成膜した試料を測定室に移動して測定を行う。磁気光学カー効果の測定は、基本的に、従来多く用いられているファラデーセル偏光面変調法を採用し、超薄膜の微小なカー回転角、楕円率の絶対値を正確に測定する目的で、新たな改良を加えた。測定装置は、すべてパソコンにより制御されており、多数回の測定を繰り返すことにより測定感度の向上を図っている。

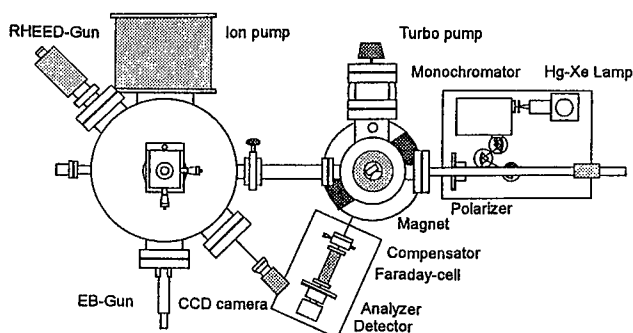


図1 測定装置上面図

第4章 ガラス基板上に成長した多結晶Fe, Co, Ni超薄膜の磁気光学効果

本章では、ガラス基板上に成長したFe, Co, Ni超薄膜の成長過程における表面磁気光学カー効果を測定し、その質量厚依存性および膜表面の構造との対応を比較、検討した。AFM観察及び偏光解析の結果より、Fe, Co, Ni/Glass超薄膜は、それぞれ質量膜厚35, 65, 50 Å以上で不連続な島状構造を取っていることが分かった。測定した縦カー効果スペクトル、複素屈折率スペクトルから計算した $\text{Re}\sigma_{xx}$, $\text{Re}\omega\sigma_{xy}$ スペクトルは、質量膜厚100 Å以下で、質量膜厚の減少に対してその形状が大きく変化する。膜が島状構造をとる40 Å以下では、 $\text{Re}\sigma_{xx}$, $\text{Re}\omega\sigma_{xy}$ の符号が逆転し、そのスペクトルに緩やかなピークが現れる。実数部のピークに対応して虚数部のスペクトルは分散型の構造を取り、スペクトルは全体として共鳴型の構造を取る。実数部のピーク位置は質量膜厚の減少とともに高エネルギー側にシフトする。この変化はFe, Co, Ni/Glass超薄膜に共通に見られ、膜が島状構造を取ることに起因していると考えられる。本実験での島状膜の平均的な島の大きさは、数100 Å程度であり、電子状態の変化の要因としては、入射電磁波の電界が個々の島を分極させることにより生じる局所場の効果、及び表面が伝導電子を散乱することによる緩和時間の減少が考えられる。前者は、表面が伝導電子の運動を遮ることによって生じる表面プラズマ振動としても理解できる。この局所場の効果を検討するため、三次元的に微粒子が分散した複合媒体の有効誘電率の表式を用いて、島状膜の伝導率スペクトルの再現を試みた。図2(a), (b)にCo厚膜の伝導率を基に計算した有効伝導率スペクトルの充填率依存性を示す。図中には、比較のため、質量膜厚20, 30, 40 ÅのCoの島状膜の $\text{Re}\sigma_{xx}$, $\text{Re}\omega\sigma_{xy}$ スペクトルを示してある。充填率 f は、島の平均的な高さ、実際の質量膜厚の比で定義される。三次元核成長による薄膜成長の場合、質量膜厚の増大とともに充填率は増大すると予想される。計算した有効伝導率スペクトルは、測定した $\text{Re}\sigma_{xx}$, $\text{Re}\omega\sigma_{xy}$ スペクトルのピークおよびその中心位置の質量膜厚依存性を明らかに再現している。すなわち、島状膜の伝導率スペクトルに生じた変化は、微粒子の表面プラズマ共鳴に起因していると考えられる。

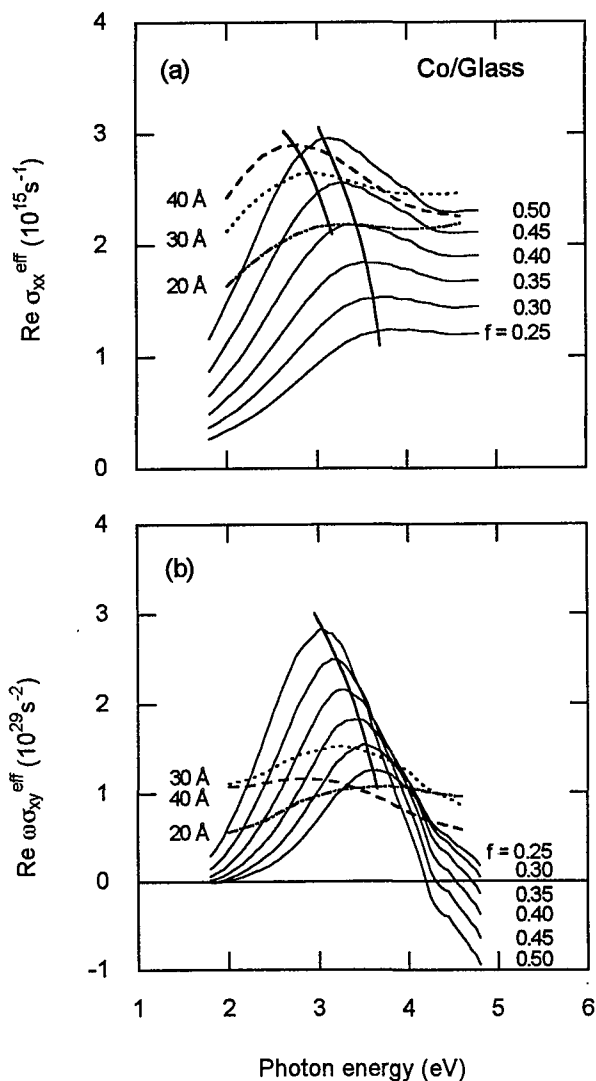


図2 Co島状膜の有効伝導率スペクトル

第5章 エピタキシャル成長Fe, Co, Ni/Cu(001)超薄膜の磁気光学効果

本章では、fcc Cu(001)面上にエピタキシャル成長させたfcc Fe, Co, Ni超薄膜の表面磁気光学カー効果測定し、その膜厚依存性および結晶構造との対応を比較、検討した。成長過程でのRHEED連続観測及び厚膜のX線回折から、膜の結晶構造、格子定数を決定した。fcc Cu(001)面上に成長したFeは、膜厚10Åまでfccであり、それ以上ではbccに転移する。一方、Co, Niは膜厚1000Åまでfcc構造を保持してエピタキシャル成長する。膜厚20ÅのCo, Niの面内格子定数は、3.59Åであり、膜は膜面に垂直方向に縮んだfct構造を取っていると考えられる。Fe/Cu(001)超薄膜の $\omega\sigma_{xy}$ スペクトルは、膜厚10Åを境にして、4eV以上の高エネルギー側の構造が大きく変化する。これはfcc→bccの結晶構造転移を反映したものと考えられる。図3にfcc Co 20Å/Cu(001)超薄膜の $\omega\sigma_{xy}$ スペクトルを実線で示す。図中には、比較のためfcc Co 1000Å/Cu(001)薄膜の $\omega\sigma_{xy}$ スペクトルを破線で示した。膜厚20Åと1000Åの $\omega\sigma_{xy}$ スペクトルは、その形状が大きく異なる。1000Åの膜のスペクトルは5eV付近に分散構造を持ち、 $\text{Im}\omega\sigma_{xy}$ は5.4eVで0を切る。薄膜20Åでは、 $\text{Im}\omega\sigma_{xy}$ が0を切る位置が、低エネルギー側に0.5eVシフトしている。同様の分散構造のシフトは、fcc Ni/Cu(001)超薄膜の場合にも見られる。

この変化とバンド構造の変化の対応について議論するため、バルクfcc Co, fcc Niの伝導率スペクトルのバンド計算を行った。計算は、OPW, LCAOを基底とし、特定の対称軸上でバンド分散が既知のバンドに一致するように結晶ポテンシャルを与えて行った。図4にfcc Coについて計算した $\text{Im}\omega\sigma_{xy}$ スペクトルの格子体積依存性を示す。計算は3d-バンド幅を変化させる意味で、格子体積を、格子定数 $a=3.54\text{\AA}$ とした場合から±6%, ±16%変化させて行った。16%の格子体積の増加に対する3d-バンド幅の減少は、1.0eVである。計算結果は定性的に実験結果を再現しており、膜厚20Åのfcc Co, Ni超薄膜の $\omega\sigma_{xy}$ スペクトルに見られる高エネルギー側の構造の変化は、格子歪み、表面の効果による3d-バンド幅の減少に起因していると考えられる。

第6章 総括

磁気光学効果の測定を通じて超薄膜の電子状態の変化を明らかにすることができた。ガラス基板上に成長した多結晶超薄膜は、成長初期に不連続な島状構造をとり、その電子状態は、表面プラズマ共鳴によって変化していると考えられる。Cu(001)面上にエピタキシャル成長した超薄膜では、格子歪み、及び表面での配位原子数の減少などの表面の効果により、3d-バンド幅がバルクに比べ減少していると考えられる。また、このような電子状態の変化による膜の磁気光学的性質の変化は、平均場近似による有効誘電率及びバンド計算等によって予測可能であることが明らかになった。

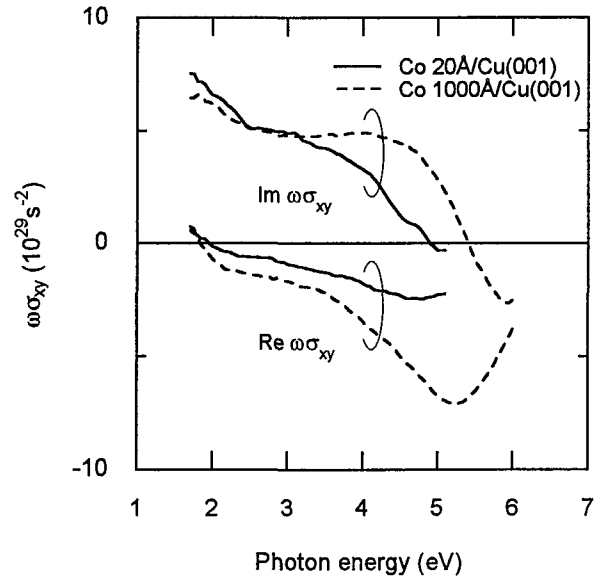


図3 fcc Co/Cu(001)超薄膜の伝導率スペクトル

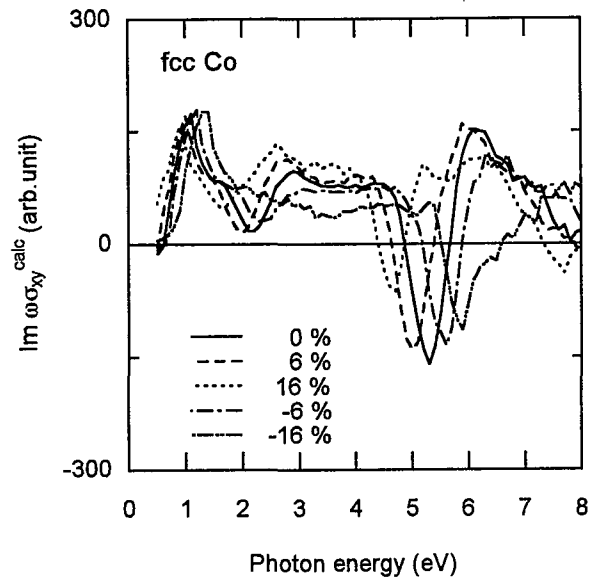


図4 伝導率スペクトルの格子体積依存性

審査結果の要旨

近年、強磁性超薄膜と非磁性薄膜とを交互に積層した金属磁性人工格子に於いて、巨大磁気抵抗効果をはじめ、興味ある現象が報告されている。それらの現象は工学的に利用できることから、強磁性超薄膜の電子状態と磁性に関して、実験及び理論の両面から系統的な研究が望まれている。しかしながら、50 Å以下の非常に薄い金属薄膜の物性を実験的に評価することは、酸化及び測定感度の点から非常に困難である。著者は、磁気光学効果により超高真空中その場で超薄膜の伝導率テンソルのエネルギースペクトルが評価できることに着目し、強磁性Fe, Co, Ni超薄膜の電子状態を薄膜の構造と対比させながら詳細に検討した。本論文はその結果をまとめたもので、全6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、磁気光学効果の測定量であるカー回転角、楕円率の大きさと交流電気伝導率テンソルとの関係を、バルク並びに超薄膜の場合について明らかにしている。さらに線形応答理論に基づいた交流電気伝導率の表式について記述している。

第3章では、本研究に於いて製作した超高真空蒸着装置及び測定装置について記述している。特に超薄膜の伝導率スペクトルを評価する方法として、高精度の磁気光学カー効果測定装置を開発したことが詳細に述べられている。

第4章では、ガラス基板上に成長した多結晶Fe, Co, Ni超薄膜について、その成長初期過程での膜の表面構造と伝導率スペクトルとの関係について詳細に述べている。多結晶Fe, Co, Ni超薄膜が、その成長初期に不連続な島状構造を取ることを明らかにした上で、膜が島状構造をとる領域では、質量膜厚の減少に対して伝導率スペクトルの形状が大きく変化し、2~4 eVを中心とした共鳴構造を示すことを見いだしている。さらにこの伝導率スペクトルの共鳴構造が、微粒子の表面プラズマ共鳴現象により定性的に説明できること、また島状膜の伝導率スペクトルが楕円体微粒子分散モデルにより再現可能であることを明らかにしている。これは重要な成果である。

第5章では、Cu (001) 面上にエピタキシャル成長したFe, Co, Ni超薄膜について、膜厚及び膜の結晶構造と伝導率スペクトルの関係について詳細に述べている。Cu (001) 面上に成長した膜厚6 Åのfcc Feの伝導率スペクトルがbcc Feのそれとは大きく異なることを、実験的に初めて明らかにしている。また膜厚20 Åのfcc Co, Ni超薄膜の伝導率スペクトルを明らかにした上で、そのスペクトルの4~5 eV付近の形状が、膜厚1000 Åの厚膜の伝導率スペクトルとは大きく異なることを見いだしている。さらにバンド計算により伝導率スペクトルを求め、その格子体積依存性を検討することにより、膜厚20 ÅのCo, Ni超薄膜の伝導率スペクトルの変化が、3d-バンド幅の減少により生じていることを明らかにし、この原因として格子歪み及び表面での配位原子数の影響を指摘している。これは重要な基礎的知見である。

第6章は総括である。

以上要するに本論文は、強磁性超薄膜の電子状態を磁気光学効果を用いて評価することに成功し、超薄膜の表面構造、結晶構造およびその二次元性が電子状態に与える影響を明らかにしたもので、応用物理学および磁気物性工学に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。