

接触型マイクロカンチレバーの開発

中 芳夫

和歌山大学大学院システム工学研究科 センシング科学クラスター
スマートセンシンググループ

概要

近年、デバイスの小型化・高密度化に伴いそれらを構成しているそれぞれの要素の小型化が進められている。各要素を載せる回路基板に関しては小さくなる要素に対応するため配線間隔の微細化が著しくおこなわれており、配線間隔の微細化がデバイスの小型化に大きく貢献している。しかし、基板内の配線間隔が狭くなることで製造時の負荷・異物の混入などによる断線・ショートが懸念される。そのためこれらを検査する必要があり、検査器の開発が進められている。このような微細間隔の回路基板の検査器の開発において重要な要素になるのが探触子である。この探触子は微細な配線間隔に対応する必要があるため検査対象の線幅よりも十分小さい必要があり、一つの探触子の大きさは数～数十 μm である必要がある。そのため高精度な微細加工がおこなえるシリコンを主材料とした探触子の開発が進められている。しかし、シリコンを用いた探触子の作製は作製工程が複雑になると探触子を個々に動作させることが困難であるため、本研究では磁性金属膜をもちいて磁場による探触子の単独動作を提案した。動作方法としては梁状に作製した探触子(カンチレバー)に交流磁場の印加により振動させる。カンチレバーの長さを任意に変えて作製することでそれぞれの長さに応じてある周波数で共振が生じる。その共振時の振幅を利用して回路基板へのタッピングによる導通検査をおこなう。このカンチレバーの作製には電気メッキ法による磁性膜の製膜、フォトリソグラフィ技術、ウェットエッチング法により形状の作製が可能である。

本研究のカンチレバーは電気メッキ法を用いて作製するが、一般的にメッキ膜は装飾などの表面処理に用いられている。しかし、本研究ではメッキ膜をカンチレバーの構造体として、また動力部として用いる。そのため、カンチレバーの設計時にはメッキ膜の材料特性が必要となる、そこで機械特性として縦弾性係数の評価、磁性膜を用いるため保磁力、透磁率の評価、また数～十数 μm の大きさでのカンチレバーの作製法、カンチレバーとしての有用性の評価・検討をおこなった。

評価・検討の結果、縦弾性係数は膜厚が薄くなることで2倍程度大きくなるという、一般的な薄膜にみられる特徴と同様の傾向がみられた。今後、磁性膜としては更なる評価・特性の向上が必要とする課題はあるが、メッキ膜製膜時の電流密度により特性が大きく依存することがわかった。そして製膜手法と製膜時に生じる内部応力を組み合わせることでカンチレバーの作製が容易におこなうことが可能であることを確認でき、共振時に磁性膜に生じる応力は塑性変形をおこなわない範囲内の応力であることを確認でカンチレバー振動型接触センサの有効性が確認できた。

目次

第1章 序論	
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
第2章 動作原理と作製技術	
2.1 動作方法の選定	3
2.2 動作原理	
2.3 磁性膜作製と要素技術	4
2.3.1 電気メッキ法による磁性膜作製	5
2.3.2 フォトリソグラフィ技術	6
2.3.3 塩化()水溶液によるエッチング	7
2.3.4 水酸化カリウム水溶液によるエッチング	
2.3.5 焼きなまし	8
第3章 磁性膜の特性評価	
3.1 機械特性(縦弾性係数)の評価	9
3.1.1 たわみ試験による評価	
3.1.2 共振試験による評価	10
3.2 磁気特性の評価	11
第4章 カンチレバー作製時の検討	
4.1 内部応力の評価	12
4.2 表面活性剤によるメッキ膜の内部応力・磁気特性	13
4.2.1 内部応力評価	
4.2.2 磁気特性評価	
第5章 カンチレバーとしての評価	
5.1 Q値・半値幅の評価	14
5.2 カンチレバーの破壊評価	15
第6章 結論	17
謝辞	18
参考文献	
付録	19

第 1 章 序論

1.1 研究背景

現在、近年、電子機器の小型化・軽量化に伴い内部搭載される回路デバイスは、より一層の小型化・高密度化が進められている。プリント配線間隔も数十 μm の線幅で作製された物を用いることが一般的であり、電子機器の小型化が進むことで線幅が数十 μm で作製された回路基板を用いられることが考えられる¹⁾。

このような微小領域で作製される回路基板は線幅が狭いため、製造途中に生じる負荷により導線が断線することが考えられる。そのため良品のみ出荷するためには検査が必要となる。現在の検査器はプローブピン型のピンテスタを用いて検査をおこなっている。このプローブピンを用いたピンテスタは検査対象となる回路基板に対応させるように任意の位置に配置し作製(検査治具)される。作製されたプローブピンは回路基板内の要所々々に用いられたプローブピンを接触させるための場所(ランド)に押し付け導通検査をおこなっている。用いられているプローブピン内には微小なバネが入っており、検査時の接触力として用いられている。しかし、このプローブピンを用いた検査では配線間隔が数十 μm 時の検査が困難である。その理由としてプローブピンは 150 μm という大きさであるため、数十 μm の線幅で作製された回路基板内の任意の配線を押さえることができず検査できない。また近年においてはそれぞれの製品開発間隔が短くなり、製品が変わるごとに回路基板も変更される。そのため、検査治具もそのつど作製する必要がありコストが大きくなるため製品としての付加価値が低下してしまう。特に微細化する配線間隔において現在のプローブピンを用いた検査方法ではプローブピンが大きすぎるため一つの導線に接触させることが不可能である。そのため、より微細化する回路基板においては十分に検査がおこなえないことが懸念されているため、微小配線間隔の回路基板が検査できるプローブピンが求められている²⁾。求められているプローブピンの接触部は数 μm という小さく作製する必要があり、微小なプローブピンの作製は様々な機関で研究・開発が進められている。研究・開発が進められているプローブピンはシリコン

を主材料として作製されているものや金属膜を用いて作製されているものがある。シリコンを用いて作製されたプローブピンは水酸化カリウム水溶液などの一部の溶液を用いることで異方性エッチングをおこなうことができ高精度なマイクロプローブ形状を作製することができる³⁾。また金属膜を用いたプローブピンは金属膜の弾性力を利用したマイクロバネの作製などがおこなわれている。このように開発が進められているプローブピンは大きさが数 μm と小さいため、ピンを多数に並べることが可能であり、多数に並べられたピンを回路基板に押し当てることで、それぞれの回路基板に対応した検査治具を作製する必要がなくなる。その結果、検査治具の作製コストが削減でき回路基板としても付加価値の増加につながる事が考えられる。しかし、これらのプローブピンはそれぞれのプローブピンが動作し接触するのではなく、全てのプローブピンが押し当てられ必要箇所の導通検査をおこなうため、それぞれのプローブピンを任意に動かすことができれば、センサの簡略化が期待される。そこで本研究ではプローブピンをピン形状で作製するのではなく磁性膜を用いたカンチレバー形状の検査探触子を作製し評価をおこなった。

1.2 研究目的

本研究で提案する回路検査器は図 1.1 に示すように数個の長さの異なるカンチレバーを並べたものを一つの要素として作製し、それらをマトリクス状に並べたカンチレバー型の回路検査器の開発を目標とする。それぞれのカンチレバーの動作方法は任意の交流磁場を印加することでカンチレバーの長さに応じた共振が生じ、その共振を利用して検査をおこなう。本研究で提案する動作方法以外の選択的な探触子の動作方法は熱膨張率の異なる金属膜を用いてカンチレバーをたわませる方法(bi-metal 構造)や、図 1.2 に示すような空気の膨張を利用して金属膜を接触させる方法などが考えられる。これらの方法は任意の探触子のみを接触させることができ、導通検査・回路動作の検査が可能になると考えられる。しかし、熱源となるレーザーの位置を高精度に制御する必要があることや構造体が複雑になることが欠点としてあげられる。

そこで本研究では微小線幅の回路基板の導通検査機構開発を目標としており、瞬間的な接触時間でも十分な導通検査がおこなえるという考えから、作製方法や構造体が比較的容易におこなえる振動型カンチレバー方式を用いることにした。

カンチレバーの磁性膜の成膜には膜厚制御を容易におこなえる電気メッキ法で成膜し、カンチレバー形状の作製にはLSI分野などで頻繁に用いられている微細加工技術を用いることにした。このようにして作製されたカンチレバーの各種特性を評価し接触センサとしての有用性を評価することを目的とする。磁性膜を用いたカンチレバー振動型の探触子を用いることでカンチレバーの動力源をカンチレバー外に設置することができる(図 1.3)ため、カンチレバーの簡略化がはかれることや共振周波数を利用することで検査箇所を選択することができることから検査システムの簡略化が期待される。しかし、検査対象となる回路基板の線幅が十数 μm であるため、探触子となるカンチレバーも十分小さい必要がある。カンチレバーに高い加工精度を実現するためにはカンチレバーの断面でのアスペクト比を小さくする必要があるため薄膜を用いて作製する必要がある。カンチレバーの作製時に用いる薄膜は設計時に必要な材料特性がバルク材での値と異なることが定説とされていること⁴⁾、また一般的には装飾などの表

面処理として用いられているメッキ法を成膜方法に用いていることから、その特性評価の前例がないため機械特性の評価を、共振周波数という振動を利用した接触方法を用いているためカンチレバーとしての評価をおこなう必要がある。

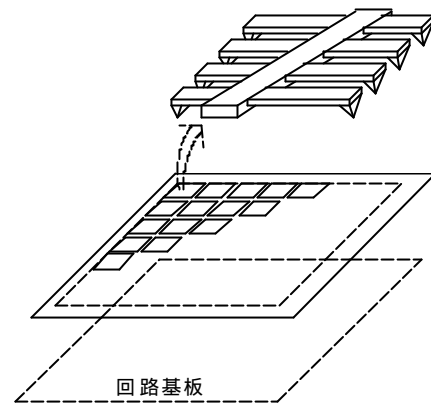


図 1.1 センサ構成図

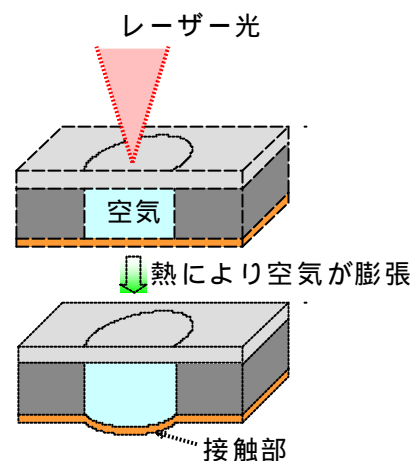


図 1.2 空気の熱膨張利用型探触子

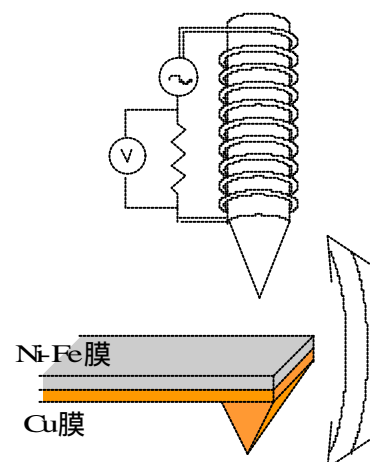


図 1.3 カンチレバー動作原理図

第2章 動作原理と作製技術

2.1 動作方法の選定

現在さまざまなアクチュエータが開発されているが従来からあるアクチュエータを以下に示す。

- ・ 圧電アクチュエータ
- ・ 静電アクチュエータ
- ・ 磁歪アクチュエータ
- ・ 磁気アクチュエータ

等があげられる。圧電アクチュエータはアクチュエータを構成する圧電セラミックスが電場を印加することによって伸縮したりする性質を利用したアクチュエータであり、一般的な特徴としては変位分解能が高く(数 nm 単位)で大きな力が発生でき、応答性に優れる(数 kHz)などがあげられる。圧電アクチュエータには基本的な動作原理から積層型バイモルフ型に分けられる。それぞれの特徴として前者が電圧印加方向と平行に伸縮するもので変位量が小さく発生力が大きい。後者は電圧印加方向と垂直方向の伸縮を利用するもので変位量は大きく取れるが発生力が小さい。しかし、どちらのタイプも駆動電圧数百 V 程度必要となる。

静電アクチュエータについてはその発生力は極板間の距離の2乗に反比例し、印加電圧の2乗に比例する。この発生力は極板の面積の関数となるため微小化に有効である反面、電極間距離を狭くしないと大きな力は得られない。

磁歪アクチュエータは外部からの交流磁場により動作させる事が可能で磁場源の高精度な位置決めを必要とせずアクチュエータの簡略化が考えられる。しかし、磁歪材料に用いられる超磁歪材料は作製方法自体が現在研究されている段階であり、応用設計をおこなう段階にいたっていない⁵⁾。

これら圧電アクチュエータ、静電アクチュエータ、磁歪アクチュエータは駆動方法の問題や原理上装置の簡略化が困難である。しかし、磁気アクチュエータは圧電型のような大電圧は必要とせず、静電型のように電圧印加時の電極間距離の精度を高精度にする必要もない。また、磁性膜の製膜も容易におこなえるため本研究の探触子であるカンチレバーの作製が可能だと考えられる。しかし、外部磁場を制御するための磁気回路が必要となるが磁歪方法と同様に非接触で動作させ

ることができるため、カンチレバーの微細化には有効な動作方式だと言える。さらに磁気駆動型カンチレバーのメリットは磁性膜を構造体として利用できカンチレバーの簡略化がはかれると言える。このような観点から磁気型アクチュエータを本研究のカンチレバーの動作方式として取り上げた。

2.2 動作原理

本研究で提案するカンチレバーは磁性膜を用いた磁気駆動型アクチュエータである。図 1.3 に示すようにカンチレバー上方にコイルを巻いた交流磁場源を配置することでカンチレバーを振動させる構造になっている。

この時、磁性膜には式(2.1)に示すような力(吸引力)が働き、ひきつけられ、振動するという非常にシンプルな構造となっている。

$$F \propto H^2 \quad (2.1)$$

F: 力 H: 磁場

なお磁性膜は電気メッキ法を用いて製膜する。

図 1.3 に示すような構造を用いることでカンチレバーの振動を容易におこなえることができ、ある周波数では共振が生じる。この共振時の著しく大きくなる振幅を利用して測定回路基板の配線に接触させ、接触している時間を利用して導通検査をおこなう。

本研究では高精度にカンチレバーを変位させ変位量を測定するのではなく、十分な力を発生させることのできる交流磁場をカンチレバーの振動のみに利用する。

そのため、磁性膜を飽和しない状態で交流磁場を印加すると振動数は印加交流磁場の2倍で振動するが、本研究ではカンチレバーの振動のみに利用するため磁気バイアスなどをおこなう必要がない。また反磁界の影響を受けようが振動すれば問題はない。また、磁歪の影響を殆ど受けない Ni: Fe = 78: 22 の Ni-Fe を用いることにした。そのため、カンチレバーの設計に際してはカンチレバーの材料としての特性が重要になる。

2.3 磁性膜作製と要素技術

磁性膜の作製方法には真空蒸着法、スパッタリング法、メッキ法などがあげられる。真空蒸着法は本大学には装置がないため利用できない。そのためスパッタ法とメッキ法を用いて磁性膜の作製をおこなった。メッキ法は昔から用いられている手法であり様々な種類がある。その種類と特徴を以下に示す。

- ・無電解メッキ法
 - ・真空メッキ法
 - ・溶解メッキ法
 - ・電気メッキ法
- などがある。

無電解メッキ法は溶液中での還元反応を利用して基板の表面にメッキ金属を析出させるもので、ごく一部の素材を除き、金属から非金属に至るまで広くめっき可能であり、膜厚精度も高いが、素材によっては前処理が非常に複雑になる。真空メッキ法は容器内を真空にして金属や酸化物、窒化物などガス化あるいはイオン化して基板表面に蒸着させる方法であるが、かなり高温処理になるという欠点があげられる。溶解メッキ法は亜鉛、錫やアルミなど金属を溶解した中に基板をいれ金属に付着させる方法であるが、高温浴作業となり、メッキの種類が制限される。これら無電解メッキ法、真空メッキ法、溶解メッキ法は装置、設備が整っていないことや使用金属が制限されるため用いることができない。一方、電気メッキ法は電極となる基板上に電荷の制御をおこないながら成膜をおこなう方法であり、膜厚制御が容易におこなえること、容易に膜厚の厚い膜を成膜できることから本研究では用いた。

この電気メッキ法を用いた薄膜の成膜には電極の作製が必要になる。電極の作製は表面研磨されたシリコンウェハー上に成膜した。表面研磨されたシリコンウェハーを基板として用いることでカンチレバー作製の工程を容易におこなえるから選択した。シリコンウェハー上にスパッタ法を用いてメッキ膜の電極(Cu 膜)となる基板の作製をおこない、電気メッキ法を用いて磁性メッキ膜(Ni-Fe 膜)の成膜をおこなう。メッキ膜成膜後はフォトリソグラフィ技術を用いてカンチレバーのパターンを形成し、イオンビームエッチングやウェットエッチング(ケミカルエッチング)を用いて不必要な部分を除去し、Ni-Fe 膜と Cu 膜の 2 層材の作

製をおこなった。しかし、この作製方法では磁性メッキ膜成膜時に電極となる Cu スパッタ膜に剥離が生じてしまうため、カンチレバーの作製が困難であった。そのため作製手法の変更を必要とした。

そこで次に用いた方法はフレキシブル基板などに用いられている、ポリイミド膜の両面に Cu を貼り付けたシート(フレキシブル基板シート)を電気メッキ法の電極として利用することにした。このポリイミド膜両面の Cu 膜は蒸着もしくは圧延されて作製された膜をポリイミド膜に接着、内部応力を除去したシートである。内部応力が除去されているため、評価したい Ni-Fe 膜の特性評価においては Cu 膜の内部応力を考慮する必要がないため電気メッキ膜の評価には有効である。このシートを電極としてメッキ膜を成膜した。磁性メッキ膜の成膜後はフォトリソグラフィ技術を用いてパターンの形成、イオンビームエッチング法もしくはケミカルエッチングを用いて Ni-Fe 膜と Cu 膜の 2 層材で構成されている梁形状の試料の作製をおこなった。不要な部分の除去にイオンビームエッチング法ではフォトリソグラフィで形成したレジスト膜も除去され必要とする形状を形成することができない。そこで不要部分の除去にはケミカルエッチング法を用いた。また、作製したメッキ膜には内部応力が存在するため、あらかじめこの内部応力を除去した状態で評価をおこなった。

2.3.1 電気メッキ法による磁性膜作製

電気メッキ法をおこなうにはメッキ浴と呼ばれる硫酸塩酸浴の作製が必要である。この硫酸塩酸浴は表 2.1 に示す割合で薬品を調合し作製した。作製された硫酸塩酸浴は安定化をはかる必要がある。これは作製直後の硫酸塩酸浴で成膜されるメッキ膜は膜厚が著しく不均一になることや水溶液中にある金属イオンの分布が不均一なため成膜した膜の特性が著しく悪くなると言われている。そのためこれらの問題を解消するため、評価に用いる磁性膜の成膜前に硫酸塩酸浴に通電をおこないメッキ膜を成膜しておく必要がある。その目安としては 1? の硫酸塩酸浴に対して 1000C 程度の電荷を使用しておけば良く、このようにして安定化をはかった硫酸塩酸浴を用いて、単位面積あたりの電流密度の条件を変化させながらメッキ膜の成膜をおこなった。また、メッキ膜成膜時には pH 値の制御が重要となるが、本研究室にはリアルタイムで pH を管理できる装置がない。そのため市販されている pH メーターを利用して、成膜前と成膜後に硫酸塩酸浴の pH 値の確認をおこない、おおむね一定値になることを確認してからメッキ膜の成膜をおこなった。本研究で作製されるメッキ膜の重量比はおおむね Ni : Fe = 78 : 22 の割合である。この Ni : Fe = 78 : 22 の比率で成膜される Ni-Fe の特徴としては磁歪の影響を殆ど受けず、振動時の磁歪の影響を考慮する必要がないことから選んだ。

表 2.1 硫酸塩酸浴(メッキ浴)成分表

薬品名	g/l
硫酸ニッケル()六水和物[NiSO ₄ ·6H ₂ O]	300
塩化ニッケル()六水和物[NiCl ₂ ·6H ₂ O]	25
硫酸鉄()七水和物[FeSO ₄ ·7H ₂ O]	10
ホウ酸[H ₃ BO ₃]	20
ラウリル硫酸ナトリウム[NaCH ₃ (CH ₂) ₁₁ SO ₄]	0.1
サッカリン[C ₇ H ₅ NO ₃ S]	少量

メッキ膜をおこなう際の電極となる基板は中性洗剤で洗浄をおこない脱脂する必要がある。脱脂処理をおこたるとメッキ膜は基板表面の油膜部分には成膜せず、メッキ膜成膜時の電流密度が変化してしまう原因になる。また、Cu 膜表面の酸化膜も電流密度を変化させ

る要因となり膜厚が著しく不均一になる可能性がある。そこで、酸化膜除去には磁性メッキ膜成膜前に濃度 10% の水酸化ナトリウム水溶液に 10 分浸ける工程を入れて酸化膜の除去をおこなってから電荷量を制御しながらそれぞれの膜厚のメッキ膜の成膜をおこなった。メッキ膜製膜時の概要図を図 2.1 にて示す。陽極側には白金(Pt)、陰極側には製膜する基板を配置し電流制御をおこないながら任意の時間通電する。

成膜条件

硫酸塩酸浴温度 : 40

pH : 2.3 ~ 2.5

電流密度 : 5、10、20mA/cm²

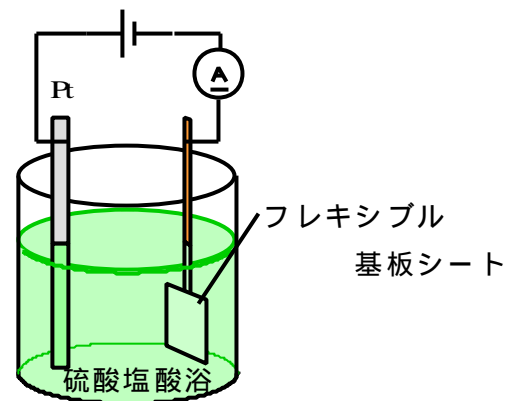


図 2.1 電気めっき法概要図

このして成膜したメッキ膜の内部には引張応力が生じる。この引張応力により反りが生じた状態でフォトリソグラフィ技術をおこなうことは困難であるため、基板となるフレキシブル基板シートの両面にメッキ膜を成膜することで見かけ上の内部応力の緩和をおこない、フォトリソグラフィを容易におこなえるようにした。

2.3.2 フォトリソグラフィ技術

この技術は半導体分野などで使われている技術であり、超LSIの分野においては幅が0.1 μm の幅での高精度なパターンングが可能な技術である。このフォトリソグラフィ技術の基本的な工程を図 2.2 に示す。

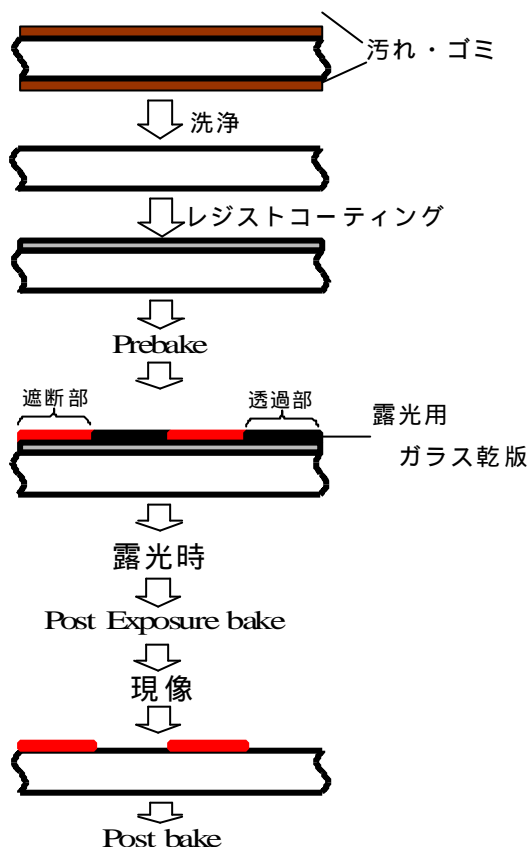


図 2.2 フォトリソグラフィ工程図

基板となるガラスやシリコンウェハー上にレジストと呼ばれる感光剤を塗布し、熱を加えてレジスト膜を緻密にする(Pre bake)。次にレジストの上からマスクと呼ばれる目的とするパターンを形成したガラス板を押さえつけ、紫外線を照射する。本研究では幅が 256 μm のパターンが作製できるマスクを用いた。マスクには紫外線が透過するところ、遮断するところがあり透過した所のみレジストが感光されレジスト成分が変化する。加熱後(Post exposure bake)し、現像することで目的とするパターンが形成される。最後に熱を加える(Post bake)ことでレジスト膜の硬質化をはかる。露光には感光された部分を除去する手法と感光されなかった部分を除去する 2 種類の方法がある。前者をポジ型、後者をネガ型と呼び、照射する紫外線の種類も

g 線[波長 436nm]と i 線[波長 365nm]がある。それぞれに対応したレジストを選ぶ必要があり、またレジストには粘度が表記してあり、粘度に応じてレジスト層の膜厚を任意に作製できることから目的に応じてレジストを選ぶ必要がある。このレジスト層の膜厚はフォトリソグラフィ工程後に溶液等を用いたエッチングをおこなう時の抵抗層としての役割があるため、エッチングの目的・種類によっては長時間のエッチングに耐える必要があるためレジスト層を厚く耐溶液性のあるレジストで作製する必要がある。しかし、レジスト層を厚く作製することで高精度にパターンングがおこなえないという問題もあり、最適なレジスト層の厚さの作成や露光時間、Pre bake、PEB(Post exposure bake)、Post bake時の時間や温度、現像の時間などの最適な条件をあらかじめ求めておく必要がある。また使用する基板表面がフォトリソグラフィ工程においては重要な条件となるため、基板表面の汚れや油脂を除去する表面処理をする必要がある。

本研究で利用するレジストは i 線のレジストを使用してポジ型のパターンの形成をおこなった。あらかじめレジスト塗布時の条件、Pre bake、PEB、Post bake 時間、露光時間を求めておき(付録 A)その値を参考に、フレキシブル基板にメッキ膜を製膜した試料の上に梁状のパターンを形成した。

使用機器

レジスト塗布：スピンコーター 1H-D7

(ミカサ株式会社)

露光器：マスクアライメント露光装置 K-310P100

(共和理研)

照射光学ユニット (ウシオ電機株式会社)

加熱器：DRYING OVEN DO-450 (iuch)

作製条件

スピンコーター回転数：4000rpm 15sec

Pre bake：2min

露光時間：20sec

PEB：2min

現像時間：1min

Post bake：15min

2.3.3 塩化鉄(Ⅱ)水溶液によるエッチング

本研究においてカンチレバーの作製にはフレキシブル基板シートを用いた作製方法を用いている。電気めっき法を用いて磁性膜を成膜、フォトリソグラフィ技術を用いてパターン形成後に不要となるNi-Fe膜とCu膜を除去することでカンチレバー形状の作製(図2.3)が可能である。

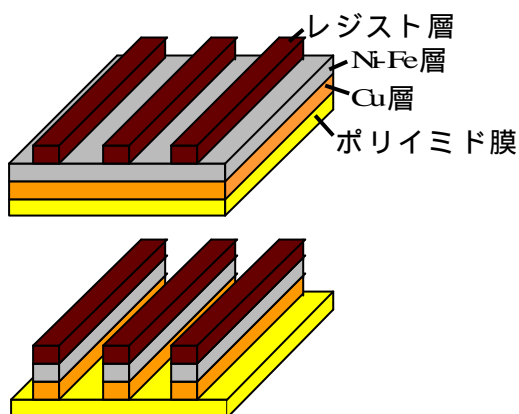


図 2.3 FeCl₃ による梁の作製

本研究ではフレキシブル基板シート上のCu膜と電気めっき法で成膜したNi-Fe膜の2種類の金属を溶解しフォトリソグラフィ工程で形成したレジストパターン通りにエッチングをおこなう必要がある。レジスト膜は溶けない薬品を選び出す必要があり、この条件に適した溶液として塩化鉄(Ⅱ)水溶液を選んだ。この塩化鉄(Ⅱ)水溶液の濃度を35%で作製したものを用いてエッチングをおこなった。エッチング方法はレジストパターンを形成したフレキシブル基板を溶液内に浸けCu膜とNi-Fe膜のエッチングをおこなう。その時、あらかじめ測定していたエッチングレート(付録B)を参考に不必要な部分のCu膜とNi-Fe膜をエッチングしフレキシブル基板の基板樹脂であるポリイミド膜と梁状のCu膜、Ni-Fe膜、レジスト層の3層材を製作した(図2.3)。フォトリソグラフィ技術によって形成したレジストパターンは幅が265μmである。梁形状で機械特性(縦弾性係数)を評価する場合、幅は長さに対して10~20倍以上は必要である。そのためフォトリソグラフィ技術で形成したレジストパターンをより大きく塩化鉄(Ⅱ)水溶液でエッチング(オーバーエッチング)をおこない梁の幅を200μmで作製した。

2.3.4 水酸化カリウム水溶液によるエッチング

塩化鉄(Ⅱ)水溶液でCu膜とNi-Fe膜をエッチングすると図2.3のようにポリイミドシート上にCu膜とNi-Fe膜とレジスト層の3層構造物が作製される。評価に必要な試料は梁状のCu膜とNi-Fe膜の2層材であるため、不要なポリイミド膜とレジストを除去する必要がある。このレジスト層とポリイミド膜の除去には水酸化カリウム水溶液を用いることにした。水酸化カリウム水溶液は腐食性が強いいため、Cu膜とNi-Fe膜に対しても腐食性の影響が考えられる。しかし、水酸化カリウム水溶液の濃度が40%、浴温80度の場合ではCu膜、Ni-Fe膜とも腐食が一切おこなわれないという結果を予備実験で確認し、またポリイミド膜を溶解することが確認できたため水酸化カリウム水溶液を用いることにした。ポリイミド膜の完全な除去には2~3時間必要とするが、Cu膜とNi-Fe膜を腐食せずレジスト膜とポリイミド膜の除去が可能である。実験に際しては浴温が80と高温になり水酸化カリウム水溶液の蒸発が考えられる。そのため、蒸発を防ぐ方法としてイソプロピルアルコール(IPA)を水酸化カリウム水溶液液面に張ることにより蒸発を防いだ。(図2.4)

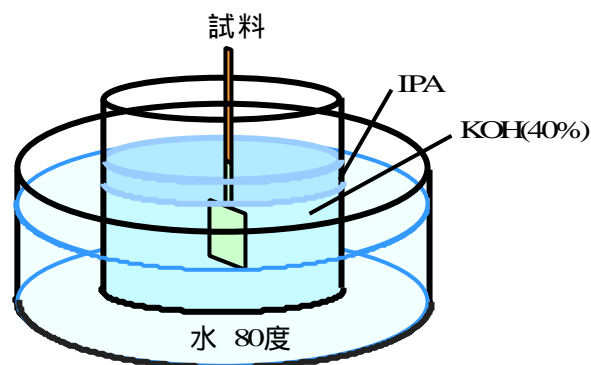


図 2.4 KOHによるエッチング概要図

2.2.5 焼きなまし

水酸化カリウム水溶液(濃度 40%)でポリイミド膜、レジスト膜を除去することで Cu 膜、Ni-Fe 膜の 2 層材ができる。しかし、この Cu 膜、Ni-Fe 膜の 2 層材にはメッキ膜製膜時の内部応力の影響が大きく現れる。この内部応力を緩和しなければ機械特性の評価が困難である。そのため一般的に用いられる内部応力除去方法である焼きなましをおこなうことにした。ここでは内部応力の除去のみを目的としているため、低い温度(300)での焼きなましをおこなった。装置概要図、拡大図をそれぞれ図 2.5、2.6 に示す。

これは試験管に熱源となるランプを設置し、ランプの熱量を電源制御しながら過熱する装置である。内部応力のある試料を治具に軽く挟み込みその治具を熱源の上のサンプル台に設置する。過熱するときはポンプを用いて試験管内の空気を抜き、酸化を低減する仕組みにしている。また、熱処理温度の調整はランプにかける電圧により制御可能であるため、電圧を調節しながら温度を調節した。

このようにして焼きなましをおこなうとメッキ膜の内部応力が開放され、平坦な Cu 膜、Ni-Fe 膜の 2 層材の作製ができ機械特性評価を容易におこなうことが可能となった。



図 2.5 焼きなまし概要図

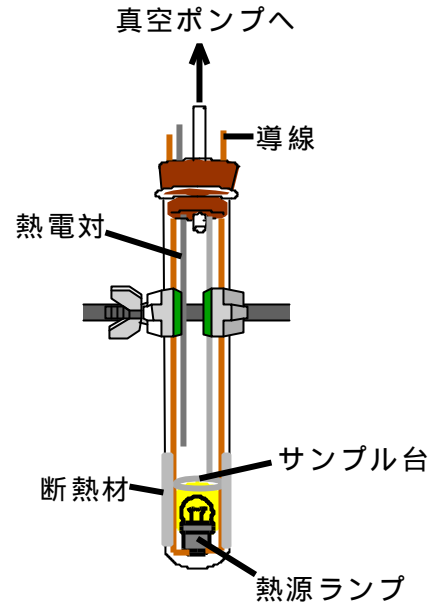


図 2.6 拡大図

実験条件

加熱条件：0 ~ 300 (14 /min の上昇)
300 20min

冷却条件：試料は試験管内で空冷をおこなった。
60 分間で 30 程度まで低下させた。

第3章 磁性膜の特性評価

3.1 機械特性(縦弾性係数)の評価

作製した Cu 膜、Ni-Fe 膜の 2 層材を用いて機械特性での一つである縦弾性係数の評価をおこなった。この縦弾性係数はバネ材として用いる本研究の目標であるカンチレバーを設計するに当たり重要な材料特性となる。また、メッキ膜を構造体として用いることに前例がないため評価をおこなう必要がある。その評価方法として本研究では 2 種類の評価方法を用いて Ni-Fe 膜の縦弾性係数の評価をおこなった。一つはたわみ試験を用いた方法、もう一つは共振試験を用いた方法である。2 種類の方法を用いたのは Ni-Fe 膜の膜厚に対する縦弾性係数の傾向や評価結果の信頼性の向上をはかるためである。

評価に用いた試料は 2 章で示した電気メッキ法、フォトリソグラフィ技術、各ケミカルエッチング、焼きなましをおこない作製した試料をもちいておこなった。

3.1.1 たわみ試験による評価

たわみ試験法は比較的容易に評価がおこなえる試験方法であり、梁状の試料であればほとんどの材料の評価が可能である。しかし、固定端の精度、膜厚の測定精度が誤差の要因となりやすいので注意しながら測定をおこなう必要がある。また本研究で評価をおこなう Ni-Fe 膜は数 μm 以下と薄膜である。そのため薄膜の膜厚測定誤差は全体を占める割合が大きくなるため膜厚の評価も慎重におこなう必要がある。

実験方法

2 章で示した方法で幅百数十 ~ 200 μm の試料を作製した。試料は作製したたわみ試験器(図 3.1)内の試料固定治具に取り付けた。試料を取り付ける部分の構成図を図 3.2 に示す。図 3.2 に示すように片持ち支持した試料の自由端を VCM(ボイスコイルモータ)に取り付けたガラスナイフで上向き荷重をかける。試料のたわみ量を光学変位計で測定すると反射光が小さすぎるため、直接試料のたわみ量を測定することが困難である。そのため VCM にミラーを取り付け VCM の変位量を光学変位計で測定することにした。VCM

の変位量は試料の変位量と同じであるため VCM の変位量を測定することでたわみ量の変位量とすることができる。こうすることで変位測定を容易にした。VCM は印加電流に応じて決まった力が発生する。あらかじめ印加電流と力の関係を求めておき、既知の荷重を加えた時の力とたわみ量の関係から縦弾性係数の導出をおこなった。

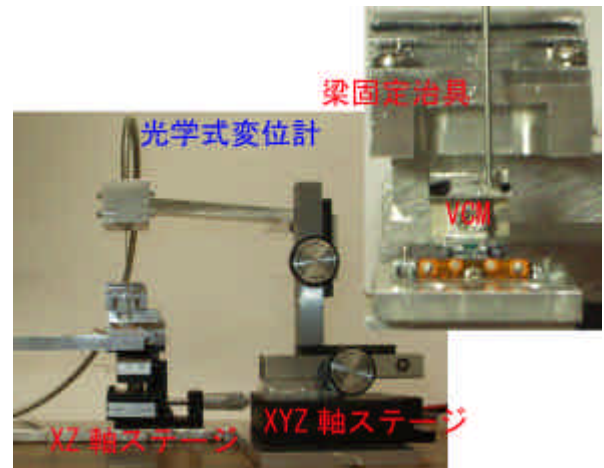


図 3.1 装置概要写真

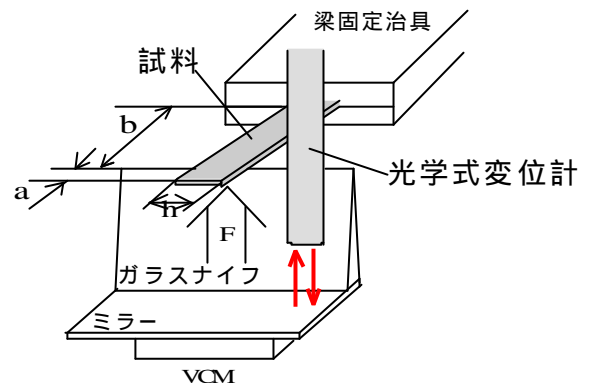


図 3.2 たわみ試験器構成図

縦弾性係数の導出方法は荷重と変位の関係から試料のバネ材としての係数(バネ係数)を導出する。バネ係数を導出するのは VCM の校正時における誤差を無視できるからである。VCM の校正時は取り付けられたガラスナイフや鏡の影響で印加電流と発生する力の関係が正比例の関係にはならず、この影響が測定結果に誤差として現れてくる。しかし、グラフの傾き(バネ係数)が変化することはないため、本研究では傾きを利用して試料のバネ係数を求め、そこから縦弾性係数の導出をおこなった。バネ係数 K と式(3.1)から 2 層材での相当縦弾性係数の導出をおこなう。そして 2 層材の縦

弾性係数から式(3.2)を用いて求めたいNi-Fe膜の縦弾性係数の導出をおこなった。導出にあたって、電極となっているCuの膜厚が8.7 μm と十分な厚さをもつ材料であるため、縦弾性係数をバルク材と同様の110G N/m²として導出をおこなった。また、メッキ膜は膜厚が1~5 μm の間でメッキ膜製膜時の電流密度を変化させて成膜したものを評価した。

$$E_{eq} = \frac{Ka^2}{6I}(2a+3b) \quad I = \frac{hd^3}{12} \quad (3.1)$$

$$E_{Ni-Fe} = \frac{E_{eq}(t_{Cu} + t_{Ni-Fe}) - E_{Cu}t_{Cu}}{t_{Ni-Fe}} \quad (3.2)$$

d=試料全体の厚さ、 E_{eq} = 相当縦弾性係数

$E_{Ni-Fe} \cdot E_{Cu}$: Ni-Fe膜、Cu膜の縦弾性係数、

$t_{Ni-Fe} \cdot t_{Cu}$: Ni-Fe膜、Cu膜の縦弾性係数

測定結果と考察

測定結果を図3.3に示す

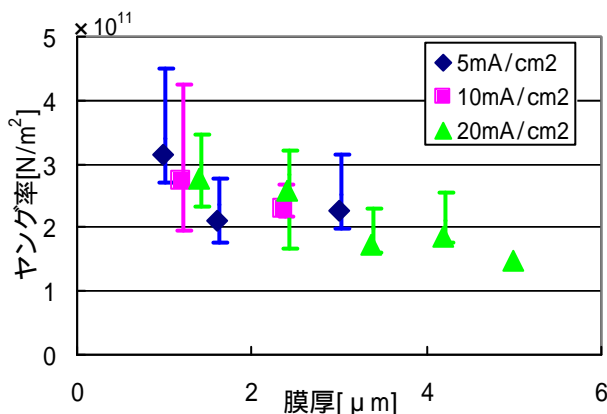


図3.3 たわみ試験による縦弾性係数

薄膜と呼ばれる厚さ4 μm 未満の試料では一種類の膜厚に対して8~14個の試料を用いて測定をおこなった。あらかじめバルク材、厚さ100 μm のNi-Feの縦弾性係数をあらかじめ測定したところ1.79 $\times 10^{11}$ N/m²であった。電流密度の変化に対しては大きな変化を見ることができないが、膜厚に関しては薄くなることで縦弾性係数が大きくなっていることが測定結果より

みうけられる。その値は膜厚が1 μm の時はバルク材の縦弾性係数と比べると概ね2倍程度になっていることがわかる。また、エラーバーの値は膜厚が薄くなることで、その幅が若干大きくなっている。これは膜厚の測定誤差が縦弾性係数に与える影響は膜厚が薄くなることで大きくなるためである。膜厚の測定は試料の切断面を用いて測定している(付録C)。しかし、測定時に老いても膜厚が不均一でない場所が少なからず見受けられる。そのため膜厚が3、4 μm と厚い場合はその不均一さの影響は全体の膜厚に対して数%に留まるのに対し、1、2 μm という薄膜では不均一さの影響は10~20%と大きな割合で影響を与える。その不均一さが薄膜時での測定誤差と測定の誤差が現れているのではないかと考えられる。

3.1.2 共振試験による評価

共振試験はたわみ試験同様比較的容易に評価がおこなえる試験方法である。評価方法は試料の振動時における共振周波数から縦弾性係数を導出する方法である。そのため本研究では磁性膜を利用していること、また梁状の試料の振動は容易におこなえることからたわみ試験とあわせて共振試験をおこなった。しかし、この共振試験は試料振動時に空気によるダンピングを大きく受けやすいため正確な評価が困難とされている。しかし本研究ではたわみ試験における傾向の確認をおこなうための手法として共振試験を用いることにした。

実験方法

たわみ試験同様上記で作製した幅百数十~200 μm の試料を作製し、それを図3.4に示すように片持ち支持し自由端の側に交流磁場を印加して振動させた。印加した交流磁場は振幅一定の正弦波を10~1KHzの範囲で振動させる。そして、試料を振動させ共振周波数を求めた。試料の振動はLDV(レーザードップラー速度計)を用いて測定した。LDVで測定したのは非接触でおこなえ、焦点が小さいため本研究で評価する試料の測定が可能であるということからLDVを用いて測定をおこなった。なお交流磁場源側にはバイアス直流磁場を印加している。これは交流磁場のみを印加してしまうとNi-Fe膜が印加磁場の2倍の周波数で振動してしまう。そのため直流磁場でNi-Fe膜を磁化し飽和

させ、向きを一方に固定させて印荷周波数と同じ周波数で振動させるようにしている。

測定された共振周波数から式(3.3)を用いて2層材の相当縦弾性係数を導出する。導出された相当縦弾性係数から式(3.2)を用いて目的とするNi-Fe膜の縦弾性係数を導出した。測定したメッキ膜はたわみ試験同様電流密度を変化させて成膜したメッキ膜を使用した。また、たわみ試験においての傾向の確認ということを目地的としているため測定はそれぞれの膜厚で一回ずつおこなった。ここで n は振動モードをあらわしている。

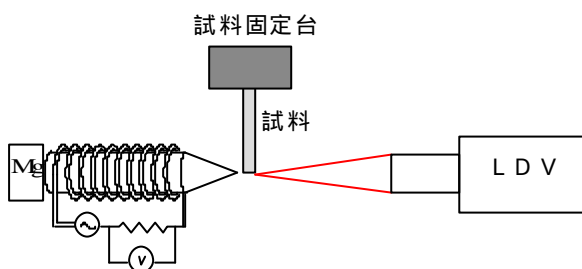


図 3.4 共振試験概要図

$$E_{eq} = \frac{48p^2 l^4 r f_n^2}{h^2 q_n^4} \quad (3.3)$$

l = 長さ r = 密度 h = 厚さ $q_n = 1.8751$

測定結果と考察

測定結果を図 3.5 に示す。

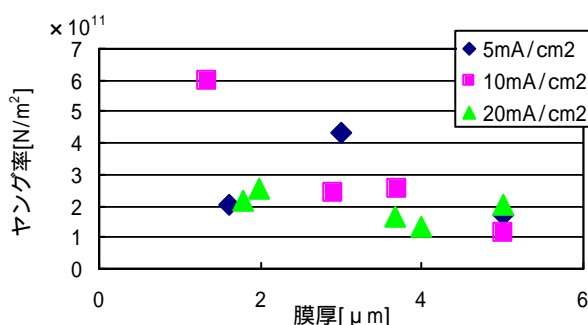


図 3.5 共振試験により縦弾性係数

たわみ試験同様に膜厚が薄くなることで縦弾性係数が大きくなっているという傾向が見られる。結果としては電気メッキ法によって作製されたNi-Fe膜の縦弾性係数は他の薄膜同様薄くなることで縦弾性係数が増加することわかった。

3.2 磁気特性の評価

本研究では交流磁場の印加によりカンチレバーを振動させる事を動作原理としているため、記録媒体等に用いられている硬質磁性材料のように保磁力が大きな材料はカンチレバーの材料には適さない。そこで保磁力が小さく高い透磁率を示す軟質磁性材料であるNi-Fe膜をカンチレバーとして用いる必要がある。

そこで本研究で作製されたNi-Feのメッキ膜の保磁力・透磁率の評価をおこなった。評価方法としては一昨年、可動型マイクロ磁場センサの研究において用いられたB-Hトレーサーを用いて測定をおこなった。しかし、測定時の印加磁場の大きさが足りなく磁性膜が飽和しなかったため測定ができなかった。そこで山形大学の石井教授に振動試料型磁力計(Vibrating Sample Magnetometer : VSM)を用いて作製したメッキ膜の測定をして頂いた。

VSM で測定して頂いた試料はメッキ膜の成膜後の磁界中熱処理や焼きなましの処理をおこなっていない。それは磁界中熱処理や焼きなまし時の条件などの評価をおこなっていないため成膜時の電流密度と膜厚に対する変化のみを評価した。電流密度を $5 \cdot 10 \cdot 20 \text{mA/cm}^2$ で製膜した試料の測定をして頂いた。

測定結果と考察

保磁力、透磁率の測定結果を図 3.6、図 3.7 に示す。測定データを付録Dに示す。

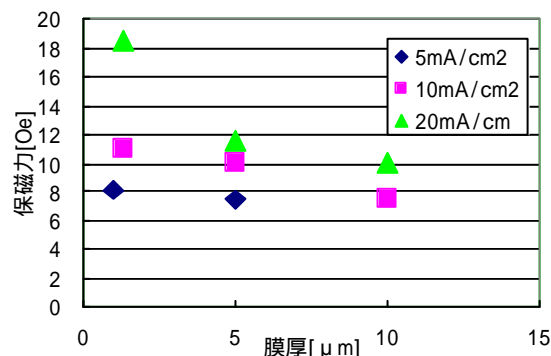
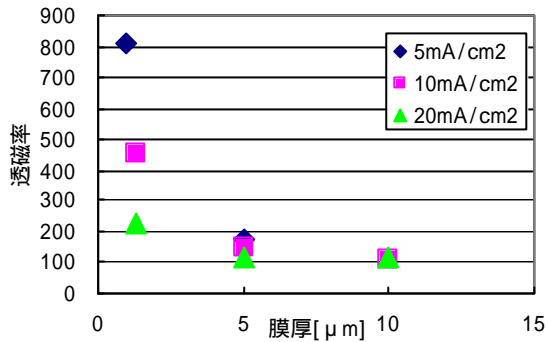


図 3.6 メッキ膜の保磁力



3.7 メッキ膜の透磁率

一般に保磁力が大きくなると透磁率は小さくなる。しかし本研究で測定されたメッキ磁性膜は保磁力が大きくなると透磁率も同様に大きくなっている。この原因は測定時の膜厚が正確でないことや電流密度の変化により成膜された Ni-Fe 膜が Ni : Fe=80 : 20 で成膜されていないことが考えられる。また内部応力の影響で保磁力、透磁率が影響を受けていることも考えられる。しかし、磁性メッキ膜で薄膜を成膜するとき電流密度を変化させて成膜することで特性は変化することがわかった。

第4章 カンチレバーの作製時の検討

4.1 内部応力の評価

電気メッキ法で作製した膜には内部応力の影響が大きく現れて反りが生じる。このことが平坦なカンチレバーの作製を困難としている原因(付録 E)となっている。

そこで本研究では比較的容易におこなえる短冊型での曲がり測定をおこなった。しかし、短冊型の測定では基板に対して測定する薄膜が十分薄いという測定条件がある。そのため、本研究で測定をおこなう際、用いた基板は厚さ 18μm の内部応力が除去された基板を用いることにし、その基盤上にスパッタ膜を膜厚 1μm まで作製し、メッキ膜は 4μm まで作製して評価をおこなった。本研究で用いているスパッタ装置を用いて 2μm 以上の厚い膜の作製には装置の性能上、装置を酷使しすぎるため、1μm までの評価にとどめた。それぞれの方法で作製した膜をフォトリソグラフィ技術、塩化鉄(Ⅱ)水溶液、水酸化カリウム水溶液を用いて梁状の試料を作製した。

作製した試料を図 4.1 に示すように固定し、顕微鏡で梁の長さ、反り量を測定し式 4.1 を用いて測定をおこなった。一般的に引張応力を正の値とし、圧縮応力を負の値とするため、本研究においても同様の表記を用いた。

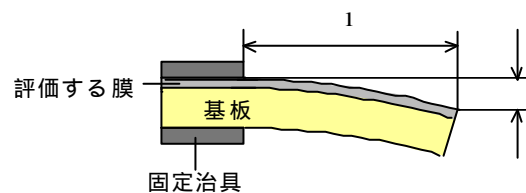


図 4.1 内部応力測定概要図

$$s = \frac{E_{Cu} t_{Cu}^2 d}{3(1 - \nu_{Cu}) t_{Ni-Fe} l^2} \quad (4.1)$$

=内部応力、l=梁の長さ、 E_{Cu} =Cu の縦弾性係数
 t_{Cu} =Cu の膜厚、 t_{Ni-Fe} =Ni-Fe 膜の膜厚
 ν_{Cu} =Cu のポアソン比

結果と考察

図 4.2 に示すような結果がえられた。

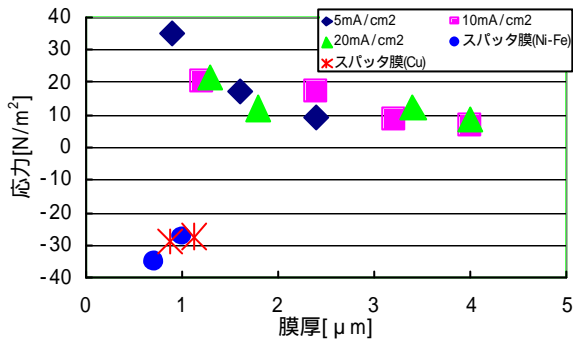


図 4.2 スパッタ膜・メッキ膜の内部応力

結果からわかるようにメッキ膜、スパッタ膜の内部応力は膜厚が厚くなることで小さくなっていくことがわかる。メッキ膜・スパッタ膜 1μm の時、それぞれの内部応力は逆方向に概ね同じ大きさで生じていることから、この 2 つの製膜方法を用いることで相対的に内部応力を打ち消しあい、平坦な梁の作製が可能であると考えられる。

4.2 表面活性剤によるメッキ膜の内部応力・磁気特性

4.2.1 内部応力評価

内部応力の除去方法には焼きなましをする方法が一般的だが、メッキ膜に関しては表面活性剤であるサッカリンの混入によって除去が可能である⁵⁾。そこで本研究でもメッキ膜の内部応力を成膜時に緩和することが可能であればカンチレバーの作製工程が簡略化される可能性がある。そのため、サッカリンによる内部応力の評価と磁気特性の評価をおこなった。

本研究で成膜するメッキ浴には 0.01g/l 未満のごくわずかなサッカリンを投入した硫酸塩酸浴(メッキ浴)を用いているが、サッカリン量を 0.45g/l 投入し成膜した。サッカリンの量を多くする投入することで成膜時のメッキ膜表面は鏡面のような光沢が増す。成膜したメッキ膜をフォトリソグラフィ技術、各ケミカルエッチングをおこない梁状に作成し反り量から内部応力の評価をおこなった。梁状にしたメッキ膜は反りがなく平坦な梁であり、内部応力が生じないことがわかった。

4.2.2 磁気特性評価

サッカリン投入(0.45g/l)時の磁気特性の評価は 3.2 章と同様に VSM を用いて評価をおこなった。評価したメッキ膜の成膜条件は 10mA/cm² である。その結果を図 4.3、4.4 に示す。測定データは付録 E に示す。

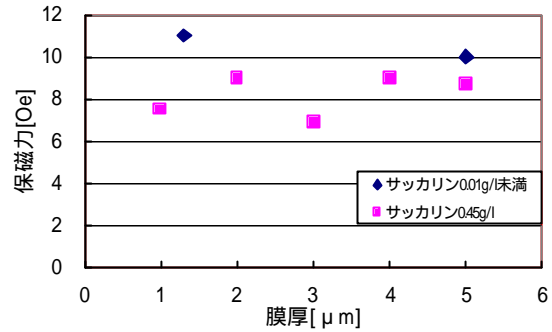


図 4.3 保磁力

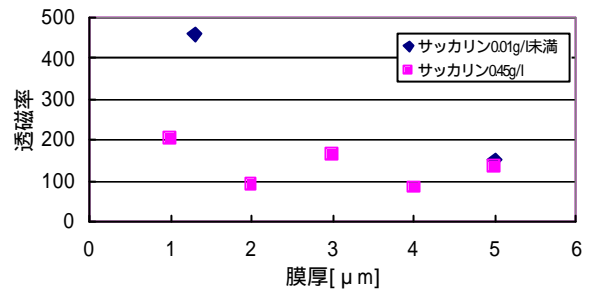


図 4.4 透磁率

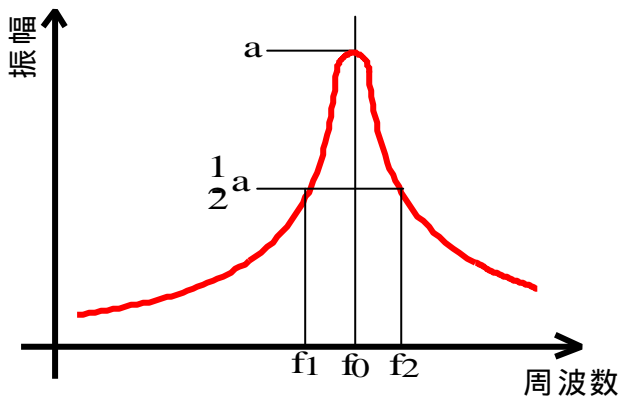
サッカリンの影響で膜厚の薄い時は透磁率が小さくなることがわかった。また保磁力はサッカリン未投入時とは反対に膜厚が薄くなることで小さくなるという傾向が得られた。これはサッカリンの影響によりメッキ膜表面が鏡面になることから表面形状が保磁力に影響を与えている可能性があると考えられる。実際にそういった表面形状による保磁力の影響という報告があるため⁷⁾、電子顕微鏡により表面形状と保磁力の関係を評価する必要があると考えられる。

サッカリンを投入することでメッキ膜内に不純物の混入が考えられるため、透磁率は著しく低下することが予想された。しかし、サッカリンを 0.45g/l の投入では膜厚が 1 μm の時で透磁率は半分程度となり、予想していた値よりも大きな値を示している。そのため内部応力の除去としてサッカリンを用いることは有効な手段の一つであることがわかった。

第5章 カンチレバーとしての評価

5.1 Q 値・半値幅の評価

本研究用いるカンチレバーの動作方法は共振周波数時の大きくなる振幅を用いて選択的に導通検査をおこなう。共振周波数を用いて選択的にカンチレバーを動かすためにはカンチレバーの共振周波数の鋭さが必要になる。その鋭さの評価は検査時と同様の評価をする必要がある。なぜなら本研究の検査方式では振動しながら検査をおこなうため回路基板に常時接触しているのではなく、瞬間的に接触を繰り返した状態で検査をおこなうタッピング方式を用いている。そのため、共振の鋭さを示す Q 値の評価は検査方法を同じタッピング状態で評価する必要がある。Q 値は図 5.1 に示すように共振周波数の値(図 5.1 中 f_0)と振幅(図 5.1 中 a)を測定する。さらに共振周波数時の振幅の半分になる(図 5.1 中 $a/2$)周波数値(図 5.1 中 f_1 、 f_2)を測定し、式(5.1)を用いて導出される共振の鋭さを示す値であ



る。

図 5.1 半値幅の概要

$$Q \text{ 値} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (5.1)$$

半値幅は $f_2 - f_1$ の値を示す。

そこで評価方法は図 5.2 に示すように共振試験と同様に試料を振動させる。振動時に固定板を押し当てることで検査と同様の状況を作製し評価をおこなった。金属膜の振動では空気によるダンピングの影響が小さいため、幅が $100 \mu\text{m}$ の試料を用いた。評価をおこなう際、試料からの距離(図 5.2 中 d)を変化させて、共振周波数時の振幅を制限して Q 値・半値幅がどのように変化するかを評価した。

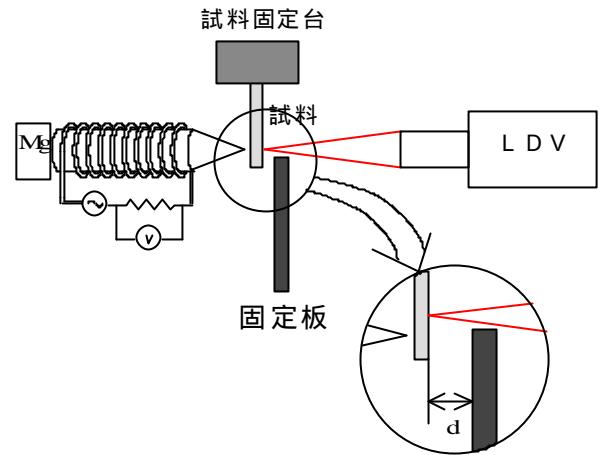


図 5.2 タッピング検査

測定条件

測定に用いた膜の製膜条件は透磁率が大きく保磁力が小さい $5\text{mA}/\text{cm}^2$ で作製した膜で評価をおこなった。

幅： $100 \mu\text{m}$

長さ： 5mm

膜厚：Cu= $8 \mu\text{m}$ 、Ni-Fe= $3 \mu\text{m}$

$d=150 \mu\text{m}$

印加磁場は一定

測定結果

固定板を用いなかった場合(free resonance)を図 5.1 に固定板を用いた場合(tapping made)の半値幅を表 5.2 に示す。測定データは付録 G に示す。free resonance 時の振幅は $230 \mu\text{m}$ 程度あり、この振幅が $150 \mu\text{m}$ に押さえつけることで $80 \mu\text{m}$ の振幅に相当するエネルギーが基板を押さえつける力となる。

表 5.1 free resonance の半値幅

共振周波数	Q 値	半値幅
300Hz	37.5	8Hz

表 5.2 tapping made の半値幅

d	共振周波数	Q 値	半値幅
150	301Hz	27	11Hz

固定板があるため、Q 値の値は小さくなるのは当然の結果といえるが、半値幅は十数 Hz と狭い値を示している。このことからカンチレバーを半値幅の時で動作するように設計をした場合、十数 Hz の範囲で共振するように設計をおこなう事で可能となる。しかし、より確実に任意のカンチレバーのみの動作をおこなう

時は半値幅をもとに共振時の周波数の幅を設計するのではなく、共振時の振幅がより小さくなる振幅時の周波数範囲で設計する必要がある。そこで振幅が 10 分の 1 になる時を評価した。Q 値の導出と同じ方法を用いて振幅が 10 分の 1 にあるときの値を評価した。その結果を表 5.3(free resonance)、表 5.4(tapping made) に示す。

表 5.3 free resonance

1/10 値幅	周波数の幅
8.38	34Hz

表 5.4 tapping made

d	1/10 値幅	周波数の幅
150	4.8	62Hz

測定結果から固定板を押し当てて振動させた場合、Q 値に相当する値は小さく、周波数の幅は大きくなり振動の鋭さが小さくなる。これは共振時の振幅が固定板によって制限されていることから当然の結果といえる。しかし、振幅が 10 分の 1 ということは基板との距離 150 μm にたいして 15 μm と十分小さい距離である。そのため一つのカンチレバーの周波数範囲を 60Hz で作製をおこなう事で隣接するカンチレバーの共振の影響を受けることなく任意のカンチレバーを目的とする場所に接触させることが可能となり検査ができると考えられる。また、本研究では 10 分の 1 という基板の距離にたいして十分小さい値を用いて評価した。しかし、一つのカンチレバーを共振時の振幅を 8 分の 1 や 4 分の 1 といった評価した値よりも大きな振幅を一つの周波数範囲とすることも可能だと考えられる。そうすることである周波数で振動するカンチレバーの種類を増やすことが可能になると考えられる。

5.2 カンチレバーの破壊評価

カンチレバーの共振時の振幅によりカンチレバー主材料である Ni-Fe 膜が材料としての降伏応力を超えてしまい塑性変形を起こしてしまう可能性がある。塑性変形が起きてしまうことで検査をおこなうことができないため、共振時に生じている応力を評価する必要がある。本研究で作製した Ni-Fe メッキ膜の降伏応力は評価装置がないため測定ができない。そこで同様の金

属である Ni 鈹(Ni 2~3%)の動荷重時の降伏応力 80 ~ 120MPa を参考にし、評価をおこなった。

評価方法は振動時に測定した共振周波数をもとに式(5.1)を用いてたわみ量 y から試料にかかっている力を導出し、式(5.2)を用いて応力を導出した。導出にあたって振幅は 300 μm と測定された振幅よりも大きな値で評価をおこなった。

$$Wl = \frac{3EI}{l^2} y \quad I = \frac{bh^3}{12} \quad (5.1)$$

l =試料の長さ、 $E=2.2 \times 10^{11}$ 、 b =試料の幅、

h =試料の厚さ W =力

$$s = \frac{Wl}{Z} \quad Z = \frac{bh^2}{6} \quad (5.2)$$

=応力、 Z =断面係数

その結果表 5.5 に示す。

表 5.5 応力

振幅	応力
300	1.188×10^7

計算結果の値はたわみ量からカンチレバーに掛かっている応力を導出しているが、この値は静荷重時のカンチレバーにかかっている応力の値である。一般的に動荷重時に生じる応力は静荷重時よりも 2 倍以上大きくなっていることが言われているため、実際には計算された値よりも大きな値がカンチレバーにかかっていると仮定しても、カンチレバーに掛かっている内部応力は比較の対象となる Ni 鈹の動荷重時の降伏応力より数分の 1 と小さいため、カンチレバーが共振におけるたわみで塑性変形がおこらないと考えられる。

第 6 章 結論

本研究では微細化する回路基板のための回路検査器としてカンチレバー振動型接触型センサを考案し、動力部である磁性膜の機械特性・磁気特性の評価とカンチレバーの作製方法・評価の検討をおこなった。

カンチレバーに用いる磁性膜は Ni-Fe 膜を用いた。この Ni-Fe 膜を厚膜化・膜厚制御が容易におこなえる事で電気メッキ法を選択し、カンチレバーの設計時に必要な特性の評価をおこなった。その結果 Ni-Fe 膜は薄膜化することで縦弾性係数は 2 倍から 3 倍に大きくなることがわかった。

メッキ膜の磁気特性として評価した保磁力・透磁率はメッキ膜の成膜時の電流密度を変化させることで異なる特性になることがわかった。今回評価した電気メッキ膜は成膜後の磁気特性を向上させるための処理は条件を評価することが困難であったため特性向上のための処理をおこなわない状態で評価している。そのため、回転磁場アニーリングなどの磁気特性の向上させる処理をおこなうことで、磁気特性は変化し、特性が向上すると考えられる。

メッキ膜の成膜時の内部応力について評価をおこなった。成膜時の内部応力除去をおこなうサッカリンの効果は大きく、保磁力・透磁率は目的に応じて十分利用できる値であった。そのため、内部応力の除去に十分利用可能な方法である。

カンチレバーの作製には様々な工程を必要とする。しかし、生じる内部応力の特徴を利用し組み合わせることで内部応力の影響を低減することが可能となる。また、カンチレバーは振動を利用して接触・導通検査をおこなうがそのために必要な振動の鋭さを実際に測定することを前提とした条件で評価した。

接触している状態で測定すると半値幅の値は小さくなり周波数の幅は大きくなるが、数十 Hz での幅があり任意のカンチレバーの動作が可能だと考えられる。その時、カンチレバーに掛かっている応力は塑性変形が生じる降伏応力より十分小さいため共振の振幅における破損はないと考えられる。

しかし、本研究で膜の評価を中心に評価をおこなっていく際に様々な課題もみうけられた。

- ・成膜時の電流密度変化に対する磁気特性の変化

- ・メッキ膜を作製するにあたって成膜時の剥離の問題
- ・ケミカルエッチング時の作製精度の向上
- ・カンチレバーの耐久性の問題

などがあげられ、今後の課題となるのではないかと考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたって終始ご指導、ご鞭撻賜った越本 泰弘教授ならびに走査型電子顕微鏡の機器の利用および指導して下さった大洋工業株式会社の浅井 頼明氏、小門 孝彰氏。また磁性膜の特性評価においては多忙な中ご協力していただいた山形大学大学院石井修教授、堀越 伸介君、縦弾性係数の導出に協力して頂いた戸田 裕己教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 大洋工業株式会社：技術カタログ記載
- 2) KURT E.PETERSEN; Dynamic Micromechanics on Silicon :techniques and Devices , IEEE TRANSCCTIONS,vol.ED-25,NO.10,OCTOBER, 1978 p.1241 ~ 1250
- 3) 河野 竜治ら他 ;Si マイクロマシニング技術を応用した LSI 検査プローブ：エレクトロニクス実装学会誌 Vol.6 No.2(2003) p.147 ~ 152
- 4) 江刺 正喜(監修); マイクロマシン(株)産業技術サービスセンター p.216 (2002)
- 5) 竹内輝明ら他 ;磁歪方式光スイッチの基礎検討：第 27 回日本応用磁気学会
- 6) 斉藤 均 ;メッキ技術の高度化に関する研究：茨城県工業技術センター研究報告 第 16 号
- 7) 森本 将人、吉田寛史 ; RE-TM 合金膜の保磁力と異方性、三重大学工学部電気電子工学科(1999)

学会発表

中 芳夫 ; 電気メッキ膜の特性評価：第 27 日本応用磁気学会 2003

付録

A フォトリソグラフィ技術

本研究でフォトリソグラフィ技術を用いた研究は初めてであったため、膜厚の特性評価・露光時間の評価をおこなった。

A.1 スピンコーター特性評価

《背景・目的》

フォトリソグラフィ工程において使用機器でのレジスト特性を評価することによって最適化をはかる必要がある。そのため回転数と膜厚の評価をおこなった。

《使用機器・レジスト》

- ・スピンコーター

ミカサ 1H-DX2

- ・レジスト

東京応化工業株式会社

THMR-ip5700(60cP)

THMR-ip3500(6 or 7cP)

《実験条件》

プロセス室(クリーンブース無し)内での実験。12~17の室温で行なった。完全だといきれないが室内は紫外線を遮断している。

《実験方法》

1. Si を約 1cm 四方にきる。
2. アセトンで Si 表面を拭き洗浄
3. スピンコーターに取り付けレジスト散布¹後、各条件(回転数)で回転させる。
Initial; 300rpm 15s
Main; 各回転数 各時間
End; 6000rpm 0.2s
 1. レジスト散布の目安としては2滴とした。
4. Si を回転させ膜厚を均一化した後、90°で2分焼く(Prebake)
5. 露光装置にて露光²
 2. 露光方法として、既存のマスクを利用し露光時間を10秒とした。
6. 110°、2分間焼く。(Post Exposure Bake)
7. 現像(HMD-W 2.38%) 1分

8. 洗浄(蒸留水、本来はリンス液)を2回行った。

9. Post Bake(120°、7分)

《実験条件》

スピンコーターの条件を以下に示す。

- ・回転数; 2000,3000,4000,5000,6000rpm で行なう。
- ・回転時間を 10,20,30sec で行なう。

《測定条件・方法》

場所: 本大学プロセス室(空調、ほこり除去設備なし)

室温: 17

膜厚測定器; 触針式膜厚計

TENCOR INSTRUMENTS Alpha-step200

《実験結果》

結果を A1、A2 に示す。

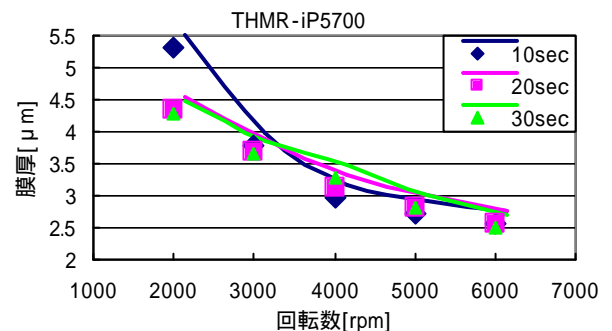


図 A1 THMR-ip5700 の回転数 - 膜厚

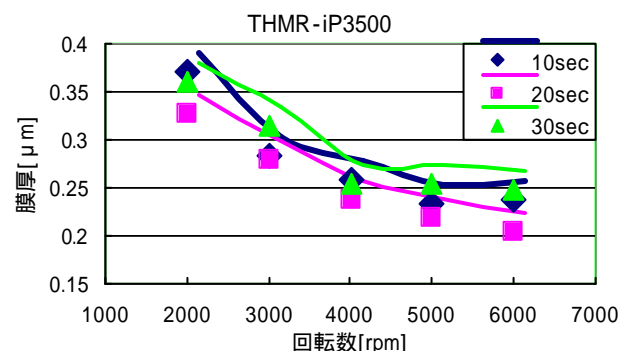


図 A2 THMR-ip3500 の回転数-膜厚

《考察》

レジスト膜厚は回転数に依存していることがいえる。粘度の高い5700のレジストは3000回転以上では回転時間に大きな変化がみられない。反対に粘度の低い3500のレジストは回転時間に依存しないことがわかる。レジストに関しては温度等の実験中の環境によって

膜圧の変化が生じている事がわかった。その変化の差は 30%という大きな値であった。3500 のレジストに関しては作成できる膜圧が薄いため環境の影響が大きくていていないと考えられる。

A.2 露光機の特性評価

《背景・目的》

露光装置の種類により水銀灯ランプの出力が異なる。そのため露光装置の使用にあたり使用レジストとランプ出力の関係を調べておく必要がある。

《使用機器・レジスト》

- ・マスクアライメント露光装置
共和理研 K-310P100S
- ・レジスト
東京応化工業株式会社 THMR-iP5700
THMR-iP3500

《実験条件》

プロセス室(クリーンブース無し)内での実験。12～17 の室温で行なった。比較的ほこりが多いと思われる。

《実験方法》

露光時間以外の各手順はスピナー特性評価で用いた手順と同じにして行なった。回転時間は 20 秒とする。

Post Bake 後、膜厚測定器を用いて露光によって掘れた深さを測定する。

《実験条件》

本研究で比較的良好に利用するだろうと考えられる膜厚(4 μ m、3 μ m)で行なった。THMR-iP5700 では 3000,5000rpm の時を行い、THMR-iP3500 に関しては THMR-iP5700 と同じ回転数での膜厚を条件として用いる事にした。

露光時間としては表 A1 に示す時間とする。

表 A1 各レジストの露光時間

THMR-iP5700	3, 5, 10, 20 sec
THMR-iP3500	3, 5, 7, 10 sec

《測定条件・方法》

場所：本大学プロセス室(空調、ほこり除去設備なし)

室温：17

膜厚測定器；触針式膜厚計

TENCOR INSTRUMENTS Alpha-step200

《結果》

結果を図 A3、A4 に示す

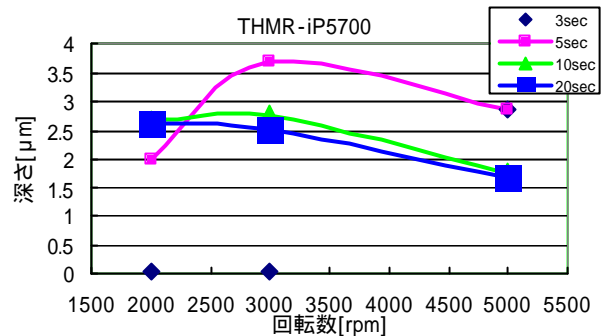


図 A3 THMR-ip5700 の回転数 - 深さ

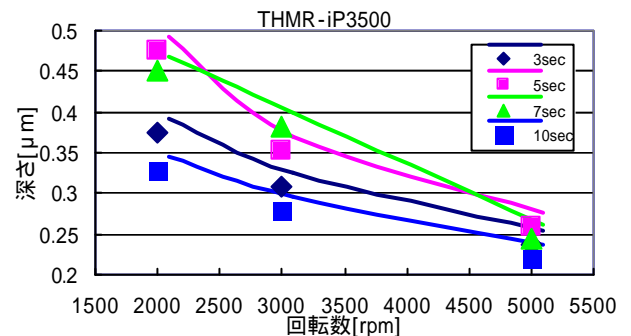


図 A4 THMR-ip3500 回転数 - 深さ

《考察》

本学校では電子顕微鏡がないためレジスト断面の観察をおこなうことができない。そのため、膜厚測定器により測定および評価をおこなった。

5700 のレジストは膜厚が厚いと時間を長くしても十分にレジスト膜が露光されていない。しかし、膜厚が薄くなるにつれて、シリコンウェハまで十分に感光されていることがわかる、3500 のレジストは膜厚が薄いので露光時間が短くてもマスクパターンが作成されている。

B Ni-Fe 膜と Cu 膜の塩化第三鉄水溶液によるエッチングレート

エッチング時の溶解速度(エッチングレート)を表に示す。エッチング液は塩化第三鉄水溶液(濃度 35%)を浴温 25 度でおこなった。

測定方法はマイクロメーターを用いて膜厚の評価をおこなった。結果を表 B1 に示す。

表 B1

材料	μ m/min
Ni-Fe	1
Cu	4

C 薄膜の膜厚測定法

本大学には膜厚測定によく用いる電子顕微鏡がないため膜の切断面を光学顕微鏡で測定をおこない導出した。まず、作製した膜を図 A1 に示すようにスライドガラスを切断したものに挟み込み、角度を任意の角度をつけ切断した。角度(図中の θ)をつけて切断することで断面積は実際の膜厚よりも厚く切断でき、薄膜の膜厚を容易におこなえることができる。この時 θ の値を小さくすることでより薄い膜厚も測定ができる。その断面の長さを測定し式 A.1を用いて必要とする膜厚を測定することができる。

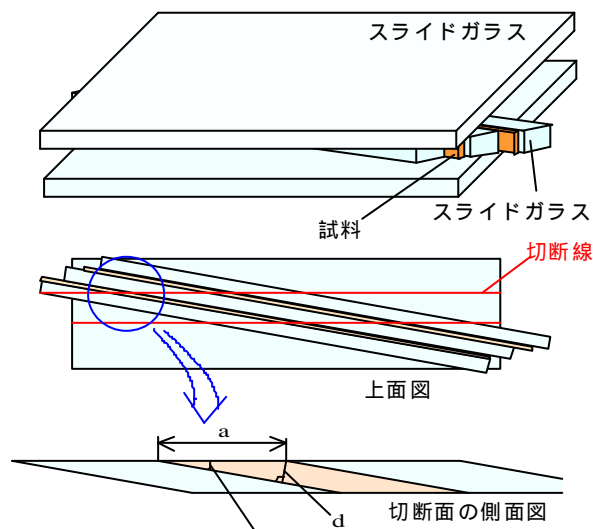


図 A1 試料の切断概要図

$$d = a \sin \theta \quad (\text{A1})$$

そこで本研究では試料はエポキシ樹脂を用いてスライドガラスに接着し、本研究室にあるダイシングカッターを用いて切断をおこなった。

切断した試料にはバリが生じているため研磨する必要がある。研磨の方法はいかに示す手順でおこなう。

1. 1000 番程度の紙やすりで表面を研磨する
2. 1500 番、2000 番と番数をあげていき表面を研磨する。
3. ダイヤモンドペースト(3 μ m、1 μ m)を用いて研磨する。
4. 研磨面の膜と接着剤の境界線が見えるまで研磨をおこなう。

このようにして研磨をおこなうと図 A2 に示すような面がみられ、それぞれの長さを測定し、膜厚の導出をおこなうことができる。



図 A2 切断面上面図

D. VSM で測定された結果

電流密度を 5 mA/cm² で成膜された VSM の測定データを図 D1(膜厚 1 μ m)、D2(膜厚 5 μ m)に示し、10 mA/cm² で作製されたデータを図 D3(膜厚 1 μ m)、D4(膜厚 5 μ m)、D5(膜厚 10 μ m)に示す。また、20 mA/cm² で測定されたものを図 D6(膜厚 1 μ m)、D7(膜厚 5 μ m)、D8(膜厚 10 μ m)に示す。

Digital Measurement System - Vibrating Sample Magnetometer

```

Filename: sam0105      Sample ID: Ni-FeOxide 050A/cm2
Date: 14 Oct 2003     Test duration: 01:07:13
Test start time: 10:34:37 Temperature: 23.9°C
Rotation angle: 0.0 deg
Volume in cc: 2.412E-06 Mass in grams: 0.0008+00
Hmax 5.000E+02        Derived
Ia 2.430E-02         RMS
Iz 2.307E-02         RMS
Vd 5.380E-01         Ir/Ia
G* hys 6.117E-01     1-(Iz/Rd)/(1/Slope at Hc)
G* hys 1.802E+00     = 1 / SPD hys
Hc 8.120E+09         Derived
dH in Oersted 4.200E+09 between +.5*Ir and -.5*Ir
SPD 6.059E-01       dH/Rc
Rmsse 90% of Ir 1.810E+00 Derived
Slope at .75*Hc 5.812E-01 [SPD]at H=0) - SPD]at H=Hc/(1.331)/Ir
Area 1st Quad 2.002E-01 RMS / Derived
Area 2nd Quad 7.748E-02 RMS / Derived
Total Area 2.744E-01 RMS / Derived
Hx eff - area 2.707E-01 Derived
Area Init Mag 5.044E-04 RMS / Derived
Init Slope dMag 6.574E-04 RMS / Derived
Max Slope dMag 1.610E-03 RMS / Derived
90 % Slope dMag 6.064E-05 RMS / Derived
Slope at Hc 1.738E-03 RMS / Derived
Inductive Hc -4.105E+00 Derived
    
```

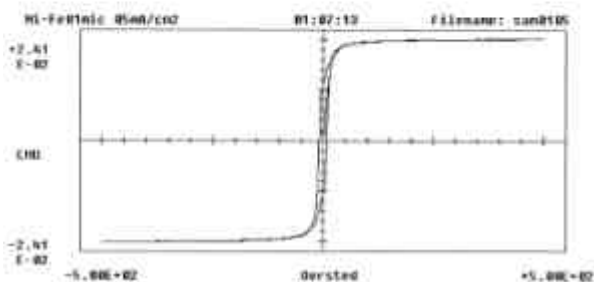


図 D1 膜厚 1 μm の時

Digital Measurement System - Vibrating Sample Magnetometer

```

Filename: sam0305      Sample ID: Ni-FeOxide 050A/cm2
Date: 14 Oct 2003     Test duration: 01:07:16
Test start time: 12:57:12 Temperature: 23.9°C
Rotation angle: 0.0 deg
Volume in cc: 2.412E-06 Mass in grams: 0.0008+00
Hmax 5.000E+02        Derived
Ia 8.192E-02         RMS
Iz 7.442E-02         RMS
Vd 1.945E-01         Ir/Ia
G* hys 4.855E-02     1-(Iz/Rd)/(1/Slope at Hc)
G* hys 1.202E+00     = 1 / SPD hys
Hc 7.802E+09         Derived
dH in Oersted 6.807E+09 between +.5*Ir and -.5*Ir
SPD 9.066E-01       dH/Rc
Rmsse 90% of Ir 5.877E-01 Derived
Slope at .75*Hc 7.410E-01 [SPD]at H=0) - SPD]at H=Hc/(1.331)/Ir
Area 1st Quad 6.284E-02 RMS / Derived
Area 2nd Quad 6.284E-02 RMS / Derived
Total Area 1.252E+00 RMS / Derived
Hx eff - area 6.229E-01 Derived
Area Init Mag 9.641E-05 RMS / Derived
Init Slope dMag 1.336E-03 RMS / Derived
Max Slope dMag 1.722E-03 RMS / Derived
90 % Slope dMag 2.604E-04 RMS / Derived
Slope at Hc 1.207E-03 RMS / Derived
Inductive Hc -9.402E+00 Derived
    
```

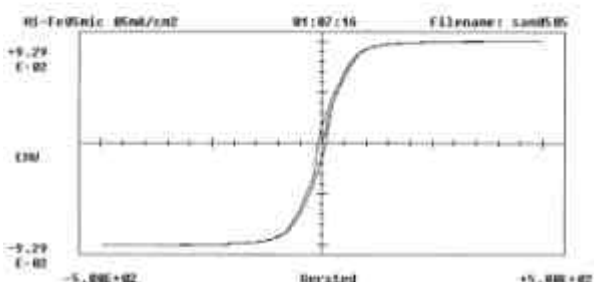


図 D2 膜厚 5 μm の時

Digital Measurement System - Vibrating Sample Magnetometer

```

Filename: sam0110      Sample ID: Ni-FeOxide 100A/cm2
Date: 14 Oct 2003     Test duration: 01:07:16
Test start time: 14:13:16 Temperature: 22.5°C
Rotation angle: 0.0 deg
Volume in cc: 2.412E-06 Mass in grams: 0.0008+00
Hmax 5.000E+02        Derived
Ia 1.958E-02         RMS
Iz 1.058E-02         RMS
Vd 6.392E-01         Ir/Ia
G* hys 5.178E-01     1-(Iz/Rd)/(1/Slope at Hc)
G* hys 1.304E+00     = 1 / SPD hys
Hc 1.102E+01         Derived
dH in Oersted 6.102E+09 between +.5*Ir and -.5*Ir
SPD 5.378E-01       dH/Rc
Rmsse 90% of Ir 2.888E-02 Derived
Slope at .75*Hc 5.876E-01 [SPD]at H=0) - SPD]at H=Hc/(1.331)/Ir
Area 1st Quad 2.181E-01 RMS / Derived
Area 2nd Quad 7.412E-02 RMS / Derived
Total Area 2.923E-01 RMS / Derived
Hx eff - area 2.827E-01 Derived
Area Init Mag 5.022E-05 RMS / Derived
Init Slope dMag 4.454E-04 RMS / Derived
Max Slope dMag 2.150E-04 RMS / Derived
90 % Slope dMag 6.864E-05 RMS / Derived
Slope at Hc 1.987E-03 RMS / Derived
Inductive Hc -1.102E+01 Derived
    
```

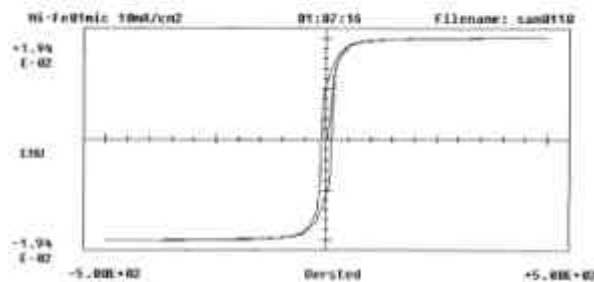


図 D3 膜厚 1 μm の時

Digital Measurement System - Vibrating Sample Magnetometer

```

Filename: sam0028      Sample ID: Ni-FeOxide 100A/cm2
Date: 14 Oct 2003     Test duration: 01:07:13
Test start time: 16:44:23 Temperature: 21.8°C
Rotation angle: 0.0 deg
Volume in cc: 2.412E-06 Mass in grams: 0.0008+00
Hmax 5.000E+02        Derived
Ia 1.200E-02         RMS
Iz 1.255E-02         RMS
Vd 1.048E-01         Ir/Ia
G* hys 1.559E-01     1-(Iz/Rd)/(1/Slope at Hc)
G* hys 1.191E+00     = 1 / SPD hys
Hc 1.102E+01         Derived
dH in Oersted 8.412E+09 between +.5*Ir and -.5*Ir
SPD 8.198E-01       dH/Rc
Rmsse 90% of Ir 5.170E-01 Derived
Slope at .75*Hc 7.450E-01 [SPD]at H=0) - SPD]at H=Hc/(1.331)/Ir
Area 1st Quad 8.422E-01 RMS / Derived
Area 2nd Quad 1.310E-01 RMS / Derived
Total Area 9.732E-01 RMS / Derived
Hx eff - area 1.175E+01 Derived
Area Init Mag 3.121E-05 RMS / Derived
Init Slope dMag 8.802E-04 RMS / Derived
Max Slope dMag 1.711E-03 RMS / Derived
90 % Slope dMag 2.370E-04 RMS / Derived
Slope at Hc 1.484E-03 RMS / Derived
Inductive Hc -9.732E+00 Derived
    
```

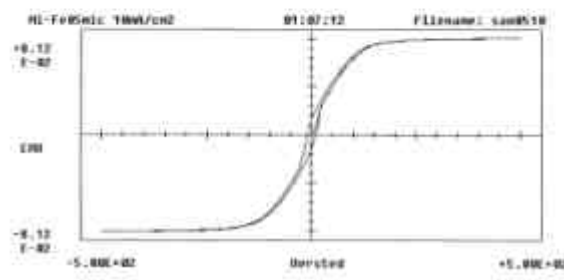


図 D4 膜厚 5 μm の時

Digital Measurement System - Vibrating Sample Magnetometer

```

Filename: sam0100      Sample ID: Ni-FeOx 1000/cu2
Date: 14 Oct 2003     Test duration: 01:07:08
Test start time: 07:43:59  Rotation angle: 0.0 deg
Temperature: 22.8°C      Mass in grams: 0.0006+00
Volume in cc: 2.412E-06  Oxidized
Wt%      Oxidized
Ia      1.612E-01      BMU
Ir      1.612E-02      BMU
RQ      1.113E-01      Ir/Ia
S* hrs  7.124E-01      1-(Ir/RQ)/(1/Slope at Hc)
O* hrs  1.028E+00      = 1 / SPD hrs
Hc      7.597E+00      Oxidized
dH in Oersted  7.124E+00  between +5*Ir and -.5*Ir
SPD     9.722E-01      dH/Hc
Hrose 30% of Ir  0.085E-01  Oxidized
Slope at .75*Hc  7.509E-01  (SPU)at H=0) - (SPU)at H=Hr/(1.333)/Ir
Area 1st Quad  1.152E+00  BMU * Oxidized
Area 2nd Quad  7.493E-01  BMU * Oxidized
Total Area     2.497E+00  BMU * Oxidized
Hc off - area  1.123E+02  Oxidized
Area Init Mag  -1.521E-01  BMU * Oxidized
Init Slope dMag  1.862E-03  BMU / Oxidized
Max Slope dMag  2.301E-03  BMU / Oxidized
90 % Slope dMag  2.492E-04  BMU / Oxidized
Slope at Hc    2.492E-04  BMU / Oxidized
Inductive Hc   -7.537E+00  Oxidized
    
```

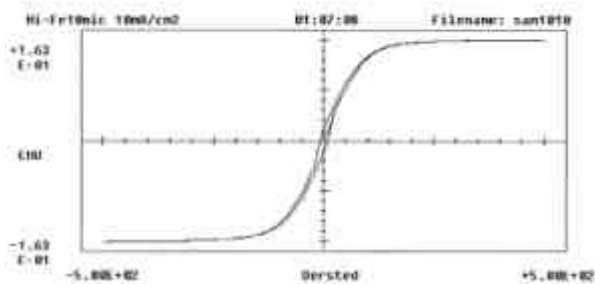


図 D5 膜厚 10 μm の時

Digital Measurement System - Vibrating Sample Magnetometer

```

Filename: sam0100      Sample ID: Ni-FeOx 2000/cu2
Date: 14 Oct 2003     Test duration: 01:07:11
Test start time: 09:07:34  Rotation angle: 0.0 deg
Temperature: 23.8°C      Mass in grams: 0.0006+00
Volume in cc: 2.412E-06  Oxidized
Wt%      Oxidized
Ia      7.752E-02      BMU
Ir      1.312E-02      BMU
RQ      1.721E-01      Ir/Ia
S* hrs  1.203E-01      1-(Ir/RQ)/(1/Slope at Hc)
O* hrs  1.203E+00      = 1 / SPD hrs
Hc      1.156E+01      Oxidized
dH in Oersted  4.562E+00  between +5*Ir and -.5*Ir
SPD     8.272E-01      dH/Hc
Hrose 30% of Ir  1.427E+00  Oxidized
Slope at .75*Hc  7.181E-01  (SPU)at H=0) - (SPU)at H=Hr/(1.333)/Ir
Area 1st Quad  7.888E-01  BMU * Oxidized
Area 2nd Quad  9.211E-02  BMU * Oxidized
Total Area     1.754E+00  BMU * Oxidized
Hc off - area  1.223E+02  Oxidized
Area Init Mag  5.304E+00  BMU * Oxidized
Init Slope dMag  6.694E-04  BMU / Oxidized
Max Slope dMag  1.161E-03  BMU / Oxidized
90 % Slope dMag  1.402E-04  BMU / Oxidized
Slope at Hc    1.141E-03  BMU / Oxidized
Inductive Hc   -1.173E+01  Oxidized
    
```

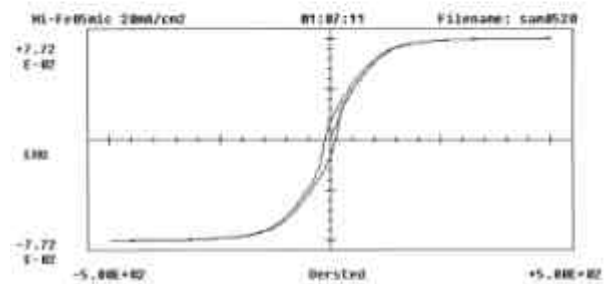


図 D7 膜厚 5 μm の時

Digital Measurement System - Vibrating Sample Magnetometer

```

Filename: sam0120      Sample ID: Ni-FeOx 1000/cu2
Date: 14 Oct 2003     Test duration: 01:07:14
Test start time: 15:24:52  Rotation angle: 0.0 deg
Temperature: 23.8°C      Mass in grams: 0.0006+00
Volume in cc: 2.412E-06  Oxidized
Wt%      Oxidized
Ia      1.737E-02      BMU
Ir      7.312E-03      BMU
RQ      4.235E-01      Ir/Ia
S* hrs  3.648E-01      1-(Ir/RQ)/(1/Slope at Hc)
O* hrs  1.472E+00      = 1 / SPD hrs
Hc      1.047E+01      Oxidized
dH in Oersted  4.235E+01  between +5*Ir and -.5*Ir
SPD     4.792E-01      dH/Hc
Hrose 30% of Ir  1.004E+00  Oxidized
Slope at .75*Hc  6.447E-01  (SPU)at H=0) - (SPU)at H=Hr/(1.333)/Ir
Area 1st Quad  6.378E-01  BMU * Oxidized
Area 2nd Quad  7.955E-01  BMU * Oxidized
Total Area     1.255E+01  BMU * Oxidized
Hc off - Area  9.513E+01  Oxidized
Area Init Mag  1.050E+00  BMU * Oxidized
Init Slope dMag  1.620E-04  BMU / Oxidized
Max Slope dMag  4.452E-04  BMU / Oxidized
90 % Slope dMag  2.412E-05  BMU / Oxidized
Slope at Hc    6.247E-04  BMU / Oxidized
Inductive Hc   -1.843E+01  Oxidized
    
```

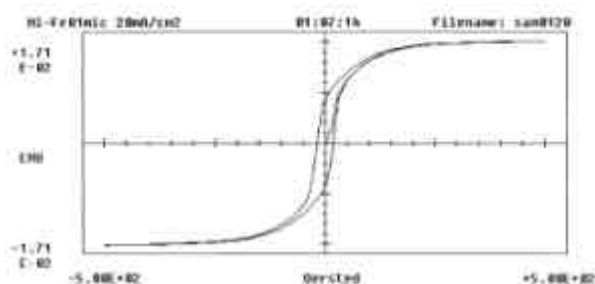


図 D6 膜厚 1 μm の時

Digital Measurement System - Vibrating Sample Magnetometer

```

Filename: sam0120      Sample ID: Ni-FeOx 2000/cu2
Date: 14 Oct 2003     Test duration: 01:07:09
Test start time: 11:45:46  Rotation angle: 0.0 deg
Temperature: 23.7°C      Mass in grams: 0.0006+00
Volume in cc: 2.412E-06  Oxidized
Wt%      Oxidized
Ia      1.691E-01      BMU
Ir      2.442E-02      BMU
RQ      1.444E-01      Ir/Ia
S* hrs  6.792E-02      1-(Ir/RQ)/(1/Slope at Hc)
O* hrs  1.104E+00      = 1 / SPD hrs
Hc      1.006E+01      Oxidized
dH in Oersted  9.133E+00  between +5*Ir and -.5*Ir
SPD     9.057E-01      dH/Hc
Hrose 30% of Ir  1.004E+00  Oxidized
Slope at .75*Hc  7.257E-01  (SPU)at H=0) - (SPU)at H=Hr/(1.333)/Ir
Area 1st Quad  1.823E+00  BMU * Oxidized
Area 2nd Quad  1.478E-01  BMU * Oxidized
Total Area     3.254E+00  BMU * Oxidized
Hc off - area  1.234E+02  Oxidized
Area Init Mag  1.187E+01  BMU * Oxidized
Init Slope dMag  1.672E-03  BMU / Oxidized
Max Slope dMag  2.312E-03  BMU / Oxidized
90 % Slope dMag  2.514E-04  BMU / Oxidized
Slope at Hc    2.432E-03  BMU / Oxidized
Inductive Hc   -1.002E+01  Oxidized
    
```

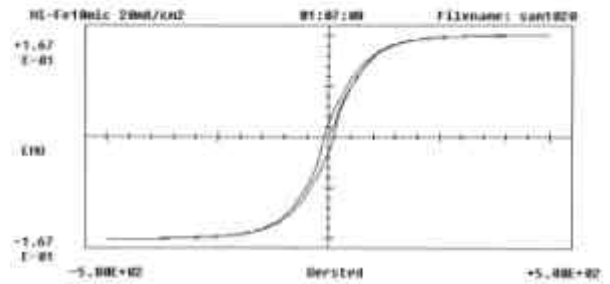


図 D8 膜厚 10 μm の時

E. メッキ膜の成膜過程と内部応力

メッキ膜は均一の膜が作製されるのではなく図 E1 に示すように一つの塊ができ、それらがくっつきあうことで膜が製膜される。

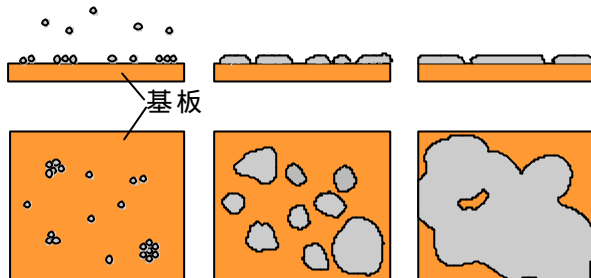


図 E1

そのためそれぞれの塊ごとに生じる小さな内部応力が重なり合って全体として内部応力が大きく現れる。特に膜厚が薄ければ薄いほどこの内部応力は大きく現れてくるといわれている。

この内部応力には2種類あり、製膜側に反る引張応力と基板側に反る圧縮応力である。メッキ膜には引張応力が働き、スパッタ膜には圧縮応力が働くことがわかっている。そのためこのメッキ膜とスパッタ膜の2種類の方法で製膜をおこなうことで内部応力が相対的に打ち消しあう事ができるのではないかと考えた。また、この内部応力を制御することができるとカンチレバー形状のみの作製ではなく、直径数 μm バネ形状のプロープピンも作製が可能になると考えられる。そこでスパッタ膜、メッキ膜の内部応力評価をおこなった。内部応力の測定方法としては

- ・ 薄膜の結晶格子のひずみ測定
- ・ 薄膜による基板の曲がり測定

(円形基板の場合、短冊型の場合)

などがあげられる。

薄膜結晶格子のひずみ測定は種類や形状に制約が少ないという利点があるが本大学にはX線回折を測定できる装置がないため、円形状基板の測定も結晶格子のひずみ測定と同様に装置はなく作製も容易ではないことから断念した。

F. VSM による測定データ(サッカリン投入字時)

VSM で測定したサッカリン投入時の磁性メッキ膜(成膜条件: $10\text{mA}/\text{cm}^2$)の結果を以下に示す。図 F1(膜厚 $1\mu\text{m}$)、F2(膜厚 $2\mu\text{m}$)、F3(膜厚 $3\mu\text{m}$)、F4(膜厚 $4\mu\text{m}$)、F5(膜厚 $5\mu\text{m}$)を示す。



図 F1 膜厚 $1\mu\text{m}$



図 F2 膜厚 $2\mu\text{m}$

Digital Measurement Systems - Vibrating Sample Magnetometer

```

Filename: sam010      Sample ID: Ni-FeMnCr100A/cr2
Date: 12 Dec 2003    Test duration: 01:07:13
Test start time: 14:22:24    Notation angle: 0.0 deg
Temperature: 22.1°C    Mass in grams: 0.000800
Volume in cc: 2.419E-06    Decsted
Hmax: 5.000E+02    SHU
Iz: 4.792E-02    SHU
Iy: 1.882E-02    Ir/Iz
IQ: 2.942E-01    Ir/Iz
G* hys: 9.263E-03    1-(Iz/Hc)/(Slope at Hc)
G* hys: 1.054E+00    = 1 / SHU hys
Hc: 4.894E+00    Decsted
dH in Decsted: 4.515E+00    between +.5*Iz and -.5*Iz
SHU: 3.435E-01    dH/Hc
Hmax 90% of Iz: 3.054E-01    Decsted
Slope at .75*Hc: 7.574E-01    (SHU[at H=0] - SHU[at H=Hc/(1.33)]/Iz
Area 1st Quad: 3.202E-01    SHU * Decsted
Area 2nd Quad: 7.283E-02    SHU * Decsted
Total Area: 4.497E-01    SHU * Decsted
Hx eff - area: 3.852E-01    Decsted
Area Init Mag: 2.182E+00    SHU * Decsted
Init Slope IMag: 3.892E-04    SHU / Decsted
Max Slope IMag: 1.351E-03    SHU / Decsted
90 % Slope IMag: 1.090E-04    SHU / Decsted
Slope at Hc: 2.046E-03    SHU / Decsted
Inductive Hc: -4.836E+00    Decsted
    
```

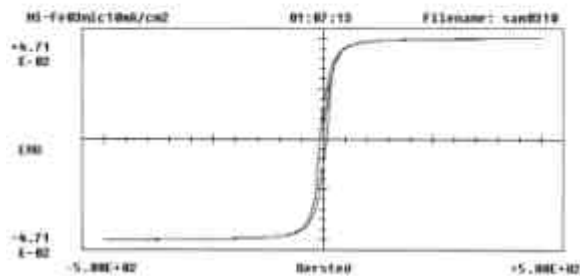


図 F3 膜厚 3 μm

Digital Measurement Systems - Vibrating Sample Magnetometer

```

Filename: sam010      Sample ID: Ni-FeMnCr100A/cr2
Date: 12 Dec 2003    Test duration: 00:40:42
Test start time: 15:44:01    Notation angle: 0.0 deg
Temperature: 22.4°C    Mass in grams: 0.000800
Volume in cc: 2.419E-06    Decsted
Hmax: 5.000E+02    SHU
Iz: 4.834E-02    SHU
Iy: 2.043E-02    SHU
IQ: 4.414E-01    Ir/Iz
G* hys: 2.794E-03    1-(Iz/Hc)/(Slope at Hc)
G* hys: 1.313E+00    = 1 / SHU hys
Hc: 4.986E+00    Decsted
dH in Decsted: 4.845E+00    between +.5*Iz and -.5*Iz
SHU: 7.617E-01    dH/Hc
Hmax 90% of Iz: 3.347E-01    Decsted
Slope at .75*Hc: 4.543E-01    (SHU[at H=0] - SHU[at H=Hc/(1.33)]/Iz
Area 1st Quad: 4.007E-01    SHU * Decsted
Area 2nd Quad: 1.417E-02    SHU * Decsted
Total Area: 1.093E+00    SHU * Decsted
Hx eff - area: 4.531E+01    Decsted
Area Init Mag: 1.132E+00    SHU * Decsted
Init Slope IMag: 6.733E-04    SHU / Decsted
Max Slope IMag: 2.518E-03    SHU / Decsted
90 % Slope IMag: 1.090E-04    SHU / Decsted
Slope at Hc: 3.160E-03    SHU / Decsted
Inductive Hc: -4.870E+00    Decsted
    
```

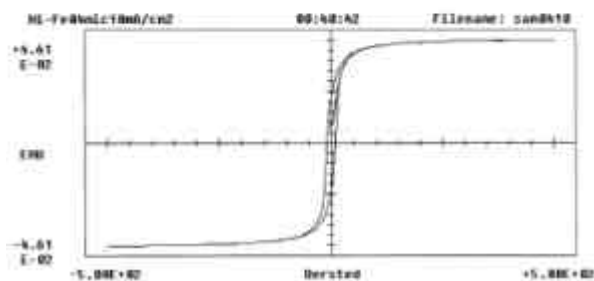


図 F4 膜厚 4 μm

Digital Measurement Systems - Vibrating Sample Magnetometer

```

Filename: sam010      Sample ID: Ni-FeMnCr100A/cr2
Date: 12 Dec 2003    Test duration: 00:40:42
Test start time: 15:55:39    Notation angle: 0.0 deg
Temperature: 22.6°C    Mass in grams: 0.000800
Volume in cc: 2.419E-06    Decsted
Hmax: 5.000E+02    SHU
Iz: 4.818E-02    SHU
Iy: 2.227E-02    SHU
IQ: 2.780E-01    Ir/Iz
G* hys: 4.345E-02    1-(Iz/Hc)/(Slope at Hc)
G* hys: 1.071E+00    = 1 / SHU hys
Hc: 4.702E+00    Decsted
dH in Decsted: 4.122E+00    between +.5*Iz and -.5*Iz
SHU: 9.134E-01    dH/Hc
Hmax 90% of Iz: 3.324E-01    Decsted
Slope at .75*Hc: 7.552E-01    (SHU[at H=0] - SHU[at H=Hc/(1.33)]/Iz
Area 1st Quad: 7.758E-01    SHU * Decsted
Area 2nd Quad: 1.380E-01    SHU * Decsted
Total Area: 1.858E+00    SHU * Decsted
Hx eff - area: 4.958E+01    Decsted
Area Init Mag: 2.212E+00    SHU * Decsted
Init Slope IMag: 1.251E-03    SHU / Decsted
Max Slope IMag: 1.779E-03    SHU / Decsted
90 % Slope IMag: 1.090E-04    SHU / Decsted
Slope at Hc: 2.792E-03    SHU / Decsted
Inductive Hc: -4.870E+00    Decsted
    
```

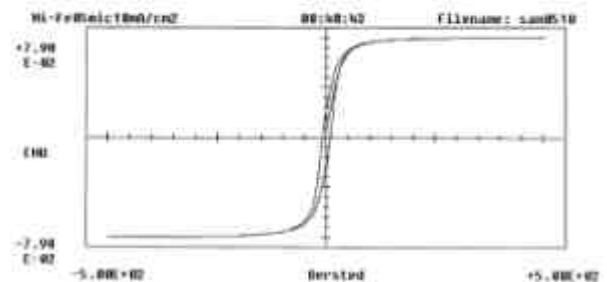


図 F5 膜厚 5 μm

G . Q 値・半値幅の評価時に用いた測定データ

d		Hz
固定板なし	共振周波数	300
	振幅が半分の時の周波数	296
		304
150 μm	共振周波数	301
	振幅が半分の時の周波数	295
		306

H Q 値・半値幅の振幅特性

固定板がない時とある場合の振幅評価をおこなった。固定板とカンチレバーの距離は本研究と同様の条件を用いた。ただし、測定時に LDV のレーザー光の照射位置は測定を容易にすることから本論よりも固定端側でおこなった。位置その結果を図 H1 に示す。

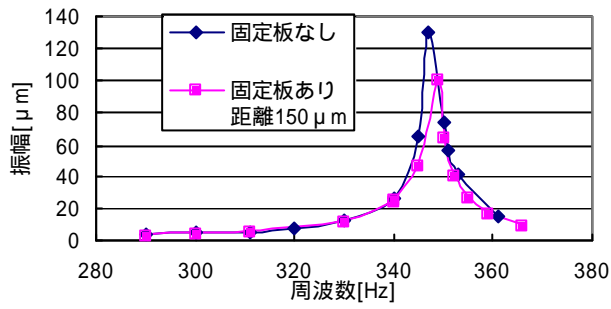


図 H1 周波数と振幅特性

固定板を用いることで接触時の共振周波数が若干大きくなることわかる。また、振幅幅が制限されていることから接触時は測定される波形は正弦波を示すのではなく、接触側の波形が潰れる事が予想されたが、測定時には見られなかった。そのため振動モードが変化している可能性があるため、接触部近辺での振動と振幅の関係の測定が必要だと考えられる。