



磁気光学効果測定のための近接場光学系

東京農工大学工学部 佐藤勝昭

最近、半導体工学で培われたナノテクノロジーが磁性の分野にも波及し、超薄膜や人工格子構造を用いた巨大磁気抵抗(GMR)素子¹⁾、磁性トンネル接合を用いたトンネル磁気抵抗(TMR)素子²⁾、磁性ドットやグラニューラ構造におけるスピンプロックードなど、磁性体微細構造に基づく現象がスピニエレクトロニクスの基礎として熱い視線を集めている。また、磁気記録の世界においてもその高密度化の流れはとどまるところを知らず、記録磁区の大きさは100 nmを切っている。

これに伴い微小領域における磁性体の磁化状態を観測する技術の開発が求められている。これには大きく分けて(1)磁性体から漏れ出す磁束を観測する手法、例えば磁気力顕微鏡(MFM)、ローレンツ電子顕微鏡、電子線ホログラフィー、走査型ホールプローブ顕微鏡などと、(2)磁化そのものに基づく現象を観測する手法、例えば磁気光学顕微鏡、スピン偏極電子顕微鏡、X線磁気円二色性(XMCD)顕微鏡などがある。本稿では、このうち磁気光学効果を用いた微小領域の磁性を観測する方法についてのわれわれの取り組み³⁾を紹介する。

通常の光学顕微鏡の分解能 d は回折限界で決定され、 $d=0.6\lambda/NA$ で与えられる。ここに λ は波長、 NA レンズの開口数^(用語)である。通常の対物レンズでは $NA \sim 0.6$ であるから、分解能は波長と同程度である。

エバネッセント光を用いて回折限界を超える分解能を実現するのがSNOM*である。金属の遮光板に作られた狭い開口部から漏れ出すエバネッセント光を用いて顕微鏡を作るアイデアは1928年に英国のSynggeによって提案されたが⁴⁾、実験的な検証は当時の技術水準では不可能であった。1984年になってようやくPohlらが実用的なSNOMを提案し⁵⁾、1985年に最初のイメージングに成功した。その後、さまざまな改良が加えられて空間分

* SNOM: scanning near field optical microscope の頭文字をとったもの。和訳は走査型近接場顕微鏡。

解能が向上し、実用レベルのSNOMが実現した。微小な磁気構造の磁気光学SNOMによる観察は、1992年にBetzigらにより初めて行われた⁶⁾。その後、プローブの改良、制御方法、解析法、アーティファクトなどに関する研究が多く報告されるようになった。

図1にわれわれの試作した透過モードのMO(磁気光学)-SNOMのブロック図を示す。基本となっているのはカンチレバー方式のAFMを用いたセイコーインスツルメンツのSPI3700型SNOMである。

最も重要な部品であるプローブについて説明しておく。光ファイバーにはsingle mode ファイバー(コア径3.2 μm 、クラッド径125 μm)を用いており、図1の挿図に示すように曲げて、先端部をとがらせプローブとしている。本研究で用いたプローブの先端部は、熱引き法とエッチング法を組み合わせで作製された。プローブの開口部付近は、金属(Al)が真空蒸着で被覆されている。金属の被覆によりクラッド層からの漏れ光を防ぎ、伝搬光が散乱されることを防いでいる。Al被覆の厚みは100~150 nm、先端部の開口の直径は80~100 nmである。Alは酸化しやすいのでプローブの保存には注意が必要である。プローブはプローブホルダーに固定される。ホルダーにはバイモルフ(振動子)があり、プローブをその固有周波数(約15 kHz)で振動させるために用いる。プローブのわん曲

部が鉛直方向を向くよう取り付けが、この装着には若干の習熟を要する。

SNOMにおいて高い分解能を得るためには、プローブと試料との距離(浮上量)をエバネッセント場の範囲内に制御することが緊要である。一般的なSNOMではプローブを音さなどで振動させ、せん断力(shear force)を検出して制御する方法が採られるが、本装置ではプローブが試料に接近して原子間力が強まることによって生じた振動の変化を、圧電アクチュエーターにフィードバックすることによって位置制御を行う。プローブと試料との間の原子間力による変位を検出するために、光てこを用いる。プローブの直線部の背の部分には反射ミラーが作られており、半導体レーザーを照射し、反射光を分割型ディテクターで検出する。これにより原子間力によるプローブのたわみによる反射角の変化を感度よくとらえることができる。この方法により浮上量は20~30 nmに制御された。

光源は、アルゴンイオンレーザーの488 nmである。レーザー光は偏光光学系を通し、カップラーでファイバーに結合する。プローブから出たエバネッセント光は試料表面で散乱を受け伝搬する光に変換され試料を透過する。光は集光レンズで集光される。レンズは試料ステージを兼ねており、試料面上の走査は圧電アクチュエーターによって試料台を動かすことにより行われている。このことにより、AFMトポグラフィ像とSNOM光学像が同時に得られる。透過光は偏光無依存のダイクロイックミラーで反射され、フィルター(光てこ用半導体レーザー波長除去)と検光子を通して光電子増倍管に導かれる。

磁気光学効果を用いたイメージングは、原理的にはプローブに直線偏光を入

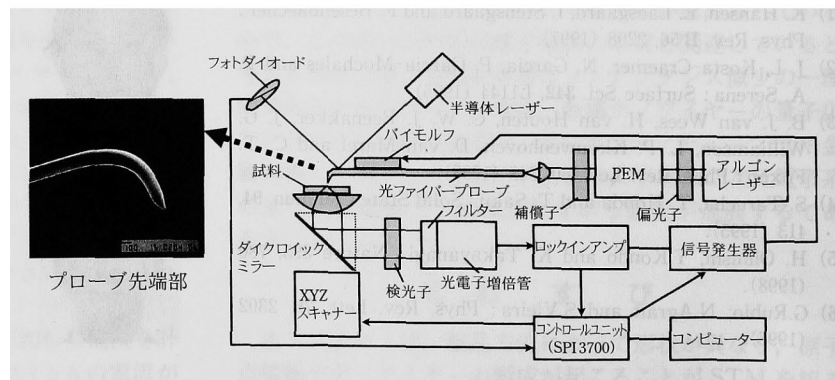


図1 MO-SNOMの構成図。

射し試料の磁気光学効果による偏光の回転を検光子により検出すれば可能である。しかし単なるSNOM光学像に比べ磁気光学像はコントラストが大変低い。十分な光の透過強度を保った場合、ファラデー回転はせいぜい $1\sim 2^\circ$ と小さいためである。もう一つの原因は光ファイバプローブの偏光特性にある。ファイバをわん曲させたことおよび先端部を絞ったことにより、入射偏光はリターデーションを受けた円偏光になる。後に述べるようにリターデーションは適当な波長板の組み合わせで補償できるが、単純な偏光子・検光子法を用いる限り信号対雑音比を高くとれないので、われわれは図1に示したように光弾性変調器(PEM)を用いて偏光を変調して高感度化を図った。鉛直から 45° の方位の直線偏光をPEMに入射すると、光の電界の鉛直成分と水平成分との間に pHz で変調されたリターデーションを与える。変調振幅を4分の1波長に設定すれば左右円偏光が交互に現れる。この変調光を光ファイバ・プローブを通して磁性体試料に照射し、透過光の鉛直成分を検光子で選択すると、プローブが何らの光学異方性をもたなければ、変調周波数($p: p=50$ kHz)成分 $I(p)$ がファラデーだ円率⁽⁹⁾を、その2倍の周波数($2p$)の成分 $I(2p)$ がファラデー回転角⁽⁹⁾を与える⁷⁾。

このSNOM装置を用いて、Pt/Co MOディスクに光磁気記録された記録マークを観察した⁸⁾。このマークは磁界変調法で光磁気記録されているので、記録マークは矢羽形状となることがわかっている。MOディスクにはグループ(溝)が刻まれているが、グループのある部分とグループのない平坦な部分のどちらにも光磁気記録されているディスクを用いた。

図2は、この記録マークをMO-SNOMでイメージングしたものである。左の図はAFMトポグラフィ像で、凹凸のあるグループ像のみが見られるが、これに対し右の図に示すように平坦部のMO像には、明確に矢羽形状(マーク長 $6\mu m$)が観測されており、空間分解能 ~ 100 nmで

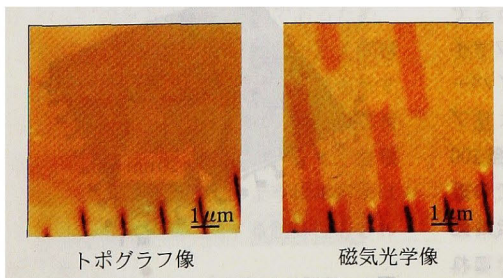


図2 Pt/Coディスクのトポグラフィ像と記録パターンのMO-SNOM像。

磁気光学イメージを得ることができた。グループのある部分では、白黒が反転した線が現れているが凹凸のある試料によって生じるアーティファクト⁹⁾であると考えられる。

ベントタイプ光ファイバプローブのストークスパラメーターを測定した¹⁰⁾。この結果、このプローブは波長板と同じ偏光伝搬特性を示すことがわかった。ベントタイププローブでは折り曲げによる光弾性のために位相差が生じるほか、クラッドを伝搬するモードが発生して、開口からの出射光の偏光度が低下すると考えられる。しかし、よくできたプローブの偏光度は遠視野測定で約0.93といふかなり高い値が得られており、開口から放出される光は大部分がプローブのコアを伝搬する光であると考えられる。

このように使用したベントタイププローブは高い偏光度をもち、偏光伝搬特性は波長板と同様の振る舞いをするのがわかった。したがって、適当な位相補償子を用いることによって補償できる。補償前には、だ円率 η_F と回転角 θ_F が混じった信号が現れるが、補償子を用いることにより、回転角によるイメージ、だ円率によるイメージを分離して得ることができた。図3にはマーク長 $0.2\mu m$ の矢羽型記録マークのだ円率像によるイメージを示す。ほぼ 100 nmの解像度で磁区像が得られた。感度は約 1 mradであった。ただ、試作された30本のプローブのうちこのような明確な特性を示すのは数本のみであるというのが現状であるという点はご理解いただきたい。また、凹凸のある試料ではプローブ顕微鏡特有のアーチファクトがあり、ゴーストが見られるのが通常である。したがって、よい磁気光学像を得るには表面の平坦な試料が望ましい。

筆者らは反射型のSNOMの開発も行っている。通常の光学像については 150 nmの分解能で得られているが、磁気光学像については、まだ高いコントラストを得ることができていない。今後の課題である。

この研究は文部省科学研究費基盤研究(A)の助成を受けた。また、装置やプローブの開発にはセイコーインスツルメンツ社の中島邦雄、光岡靖幸両氏にお世話になった。また、Pt/Coディスクは日立マクセル(株)の粟野博之氏および(株)日立製作所の牛山純子氏から提供を受けた。ここに感謝する。

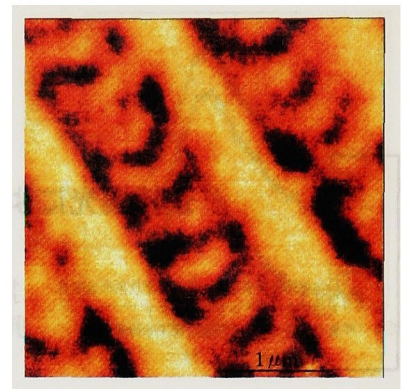


図3 Pt/Coディスクに記録されたマーク長 $0.2\mu m$ の光磁気記録パターンのMO-SNOM像。

- 1) 猪俣浩一郎: 応用物理 **63**, 1198 (1994).
- 2) 猪俣浩一郎: 応用物理 **69**, 186 (2000).
- 3) 佐藤勝昭: 固体物理 **34**, 681 (1999).
- 4) E. H. Syngé: Phil. Mag. **6**, 356 (1928).
- 5) D. W. Pohl, W. Denk and M. Lanz: Appl. Phys. Lett. **44**, 651 (1984).
- 6) E. Betzig, J. K. Trautman, T. D. Harris, J. S. Weiner and R. L. Kostelak: Science **251**, 1468 (1991).
- 7) K. Sato: Jpn. J. Appl. Phys. **20**, 2403 (1981).
- 8) K. Sato, T. Ishibashi, T. Yoshida, J. Yamamoto, A. Iijima, Y. Mitsuoka and K. Nakajima: J. Magn. Soc. Jpn. **23**, Suppl. S1, 201 (1999).
- 9) H. Hatano, Y. Inouye and S. Kawata: Jpn. J. Appl. Phys. **37**, L1008 (1998).
- 10) T. Ishibashi, T. Yoshida, A. Iijima, K. Sato, Y. Mitsuoka and K. Nakajima: J. Microscopy **194**, 374 (1999).

用語の解説

開口数, NA (numerical aperture): 屈折率を n , レンズの開口角の $1/2$ を α として、開口数は $NA=nsin\alpha$ で与えられる。

ファラデーだ円率, ファラデー回転角: 磁性体の磁化方向に平行に直線偏光を入射したとき、出射光は一般にだ円偏光になるが、だ円の短軸と長軸の比をファラデーだ円率、主軸の回転角をファラデー回転角という。

分類番号 7.10, 5.7

Near-field optical systems for magneto-optical measurements.

Katsuaki SATO, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology. E-mail: satokats@cc.tuat.ac.jp