

Title	レーザービーム走査型磁気光学顕微鏡の開発と超伝導 体中の磁束観測
Author(s)	村上, 博成
Citation	大阪大学低温センターだより. 2011, 153, p. 25-29
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/9983
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

レーザービーム走査型磁気光学顕微鏡の開発と 超伝導体中の磁束観測

レーザーエネルギー学研究センター 村上 博成 (内線7982)

E-mail: hiro@ile.osaka-u.ac.jp

光と磁気の相互作用により光の偏光面が回転する効果は一般に磁気光学効果としてよく知られて いるが、その一つに1845年マイケル・ファラデーによって発見された磁気光学ファラデー効果があ る。これは、ある物質に磁場をかけ、それと平行な方向に直線偏光を透過させたときにその偏光面 が旋光する現象のことで、このときの旋光度(ファラデー回転角) _Fは以下の式によって与えら れる。

$$_{\rm F}=VtH$$
 (1)

ここで、*V*は光が通過する物質(ファラデー素子)の種類、光の波長、温度などに依存する定数 でヴェルデ定数と呼ばれる。また*t*はファラデー素子の厚み、*H*はファラデー素子にかかる垂直磁 場(直線偏光が進む方向と同じ方向の磁場)である。また、_Fの符号は*H*の方向に対応して変化し、 直線偏光がファラデー素子内を往復して戻ってくるときはその大きさは2倍となる。

本研究では、この磁気光学ファラデー効果を使って、超伝導体中の磁束分布および超伝導デバイ ス中の局所的な磁気シグナルの高速検出を目的として、レーザービーム走査型の磁気光学顕微鏡の 開発を行った^[1]。

この磁気光学顕微鏡について言えば、従来から超伝導体中の磁束観察などに使用されているが、 今回開発したシステムの主な特徴として、

従来の磁気光学顕微鏡が何れも水銀ランプやハロゲンランプなどの光源を用いた通常の明視野顕 微鏡法をベースとして、また冷却CCDなどを用いて磁束の二次元分布像を観察するのに対し、 開発したシステムではレーザーを光源としてガルバノメータによりレーザービームを二次元走査 することにより1画素ごとの信号を検出している。

レーザー光検出部を2つの検光子とフォトダイオードを有した差動型検出器の構成にしているため、データの積算や平均化などの処理を一切することなく5µT(テスラ)程度の磁気感度を達成している。また、この構成のため磁束の向きや大きさを直接反映した信号を得ることが可能である。

レーザービームを試料表面上で走査させながら磁気光学信号を検出するため、試料内の特定の位

置にレーザービームを固定することで、デバイス内の局所的な磁気シグナルを連続的に検出する ことが可能である。

画素ごとのデータサンプリングを行うため、磁場変調、光変調法などを併用してロックイン検出 することで、より高感度なイメージングおよび信号検出が可能。

などが挙げられるが、以下にその詳細について述べる。

まず構築したシステムであるが、図1にその概略図を示す。



図1.レーザービーム走査型磁気光学顕微鏡システムの(a)概略図と(b)写真

このシステムでは光源として主に空冷式のArレーザーから出射される波長514 nmのレーザービ ームを使っている。このレーザービームはもともと直線偏光されているが、その偏光度を高めるた め消光比の高い偏光子(グランテーラープリズム:消光比10⁶)を通している。その後ガルバノメ ータを介し、最終的に対物レンズを通して試料表面上にスポットとして照射される。このガルバノ メータから対物レンズの間のレーザービーム走査光学系はビームエクスパンダー構成となってお り、これによりレーザービームの広がり角が抑えられ、また開口数(NA)の大きな対物レンズを 使用することにより1 µm以下のスポット径が達成されている。このときの照射スポット径は空間 分解能と直接関係しており、またレーザー照射位置を固定して特定の領域で信号検出を行う際の位 置精度の目安として重要なファクターでもある。なお、このとき対物レンズから出てくるレーザー 光のパワーは1 mW程度である。

一方試料部であるが、観測試料の表面には金属反射膜付のファラデー素子(Bi置換型希土類鉄ガ ーネット膜)がスプリングによって押しつけられて密着して取り付けられており、この金属反射膜 を介してファラデー素子を往復して直線偏光が反射してくる。この際、レーザー入射方向と同じ向 きにガーネット内部への磁束の侵入があればレーザービームの偏光面がファラデー効果によってフ ァラデー回転することになる。

磁気光学顕微鏡では、この「の変化をイメージングするが、従来の磁気光学顕微鏡では、偏光

面を直交配置(クロスニコル)にした一組の偏光子と検光子を使ってこのファラデー回転成分 $Esin_F(Elt検光子に入射するレーザーの振幅)を取り出している。この回転成分を電荷結合素子$ (CCD)やフォトダイオード(PD)で検出した場合、その光強度に比例した出力が得られるため、 $出力信号は<math>E^2sin^2_F(~_F^2)(ただし、~_F^0)$ すなわち磁場強度の2乗に比例したものとなって しまう。よってこの出力値から直接的に磁場の大きさや方向を求めることはできない。

またこのクロスニコルでの磁気検出感度について少し検討してみると、消光比が最も高い10⁶を 持つ偏光子、検光子の組を使った場合においても、検光子に入射する光はパワーにして10⁶程度が その偏光面に関係なく通過して検出器に入力されることになる。一方、ガーネット膜のファラデー 回転能は、我々が現在使用している1.4 µm厚のもので約3×10⁶ rad/Oe程度であり^[2]、これを仮に 10⁴ rad/Oeにしたとしても、10 Oe (エルステッド)(=1 mT)程度の磁場を印加しない限り、観 測すべき光の強度は漏れ光の強度より小さくて信号の検出が難しいことを意味している。よって従 来の磁気光学顕微鏡の場合、より高感度な測定を行おうとすれば、イメージングの際に積算や差分 等の方法をとる必要がある。

今回構築したシステムでは差動検出方式を採用することにより、ダイナミックにこの漏れ光の影響や、各光学素子表面で散乱され反射してくるノイズ光の影響を抑えることに成功した。以下にその詳細について述べる。

試料部で反射したレーザービームは入射光と同じパスを通って戻ってくるが、途中ビームスプリ ッターによりこの差動検出部へと導かれる。

この差動検出部は、光学的には分割比50:50の無偏光ビームスプリッター(BS)と2組の検光 子とフォトダイオードからなっており、これら検光子の偏光面は偏光子の偏光面に対してそれぞれ プラス45度、マイナス45度だけ傾けた状態で固定されている。この2つのフォトダイオードの電流 出力を差動増幅器にかけて増幅した後、ADボードを介してパソコンにデータとして取り込んでい る。

この際の差動増幅器からの出力は、簡単な計算を行えば*E*²sin2_F、すなわち_F(_F~0)に比例 することがわかる。このことは、出力信号が直接磁場の大きさおよび方向をも反映したものになる ことを意味している。

実際のイメージング時のデータ取得については、積算、平均化などは一切行わずにAD入力ボー ドを使って2 µsもしくは10 µs毎のサンプリングを行っている。よって、イメージングに要する時間 は500×500ピクセル時の観察で約1秒もしくは5秒程度である。現在モーター駆動のガルバノメー タを使用しているため、それほど高速のイメージングを行うことはできないが、X方向走査用のガ ルバノメータを共振駆動タイプに変更することにより、イメージング時間を極端に短縮することも 可能である。

以上述べてきたように、このシステムを使えば磁束の空間分布をその方向も含めて観察するこ とが可能である。図2に実際にYBa₂CuO₇.(YBCO)薄膜ストリップライン(線幅300 μm、膜厚 200 nm)に1Aおよび3Aの電流を印加した際にストリップラインの周辺に発生する磁場を観察した 結果を示す。ストリップラインの周りに発生した回転対称の磁場分布が確認できる。なお、この磁 気光学イメージは500×500ピクセルのデータか ら成っており、画素データの取得はレーザービ ームをガルバノメータでXY方向にラスタースキ ャンさせる途中の2μs毎の瞬時データを取り込む ことにより行った。全体のイメージの取得に要 した時間は約1秒である。また、冷却試料の測 定では、クライオスタットの振動の影響がノイ ズ源となるが、室温の試料に対する磁気検出感 度は、平均化などの処理を一切行わない条件下 において約5μTを達成している^[1]。

また、本システムの特徴の一つである局所的 な磁気シグナルの観察であるが、このシステム ではガルバノメータを使ったレーザービームの スキャン方式を採用しているため、観察される2 次元イメージとガルバノメータのスキャンプロ グラムの座標を照合することにより、磁気光学 イメージ上の希望する任意の場所にレーザービ ームの照射位置を固定して、その場所での局所 的な磁気シグナルを連続的に観察することが可 能である。その一例として図3に単一のSQUID を有するジョセフソン・ボルテックスフロー型 トランジスタを使った実験結果を示す「3」。測定 では3×3 μm²のループ面積を持つSQUIDの周辺 に設けたコントロール電流ラインにパルス電流し を印加し、SQUIDループ内に発生する磁束の観 察を、このループ内にレーザービームを固定し た状態で連続的に行った。この際、このデバイ スのコントロール電流 - SQUIDフロー電圧特性 から予め、コントロール電流3mAに対し1つの 磁束量子がSQUIDループ内に発生することが観 測されており、図3bに示す/c=3 mA、6 mAのパル ス高をもつ電流を印加した際のシグナル変化は それぞれループ内に1個、2個の磁束量子が発生 したことを示している。



図 2 . YBCOストリップラインに電流を印加した際 に発生する磁場分布。(a)電流1 A、(b)電流 3 A印加時。(c)各挿入ラインに沿った磁場分 布。



図3.(a) YBCO-ジョセフソン・ボルテックスフロ ー型トランジスタ。(b) コントロール電流を パルス的に流した時のSQUIDループ内の磁気 光学シグナル。

またこの局所的なシグナル検出において、その検出速度は高速デバイスなどへの応用を考える際 重要であるが、現在使用している差動増幅器の帯域が30 MHzであり、この帯域によって制限され ている。しかしながら、ファラデー素子自体の応答性はピコ秒程度とかなり高速であり、今後光検 出系の高速化を行うことにより少なくとも1 GHz程度の高速信号の取り扱いは可能になると考えて いる。

最後に、より高感度なイメージングを行う上で、本システムではロックインアンプを利用した交流変調法による測定ができるのが大きな特徴の一つと言える。これは従来のCCDを使った2次元 画像取得法では不可能で、このシステムでは個々のピクセルデータを順次読み込むためこのロック イン検出が可能となる。またこの交流変調法には磁場変調、光変調などを使うことが可能である。

図4にその一例としてジョセフソン・ボルテックスフロ ー型トランジスタのコントロール電流ラインに変調周波 数40 kHz、振幅3 mAの電流を流し、コントロールライ ンの周辺に生じる変調磁場を観察した結果を示す。従来 の直流電流の印加では100 mA近く電流を流さないとこの ような発生磁場の分布観察はできなかったが、このロッ クイン検出により僅か3 mAの印加電流でも、発生する磁 場分布の様子、さらに詳細にはライン括れ付近に集中し た磁束やジョセフソン粒界接合部に侵入した磁束の観察 もできていることがわかる。

以上、今回構築したレーザービーム走査型磁気光学顕 微鏡の特徴について紹介させていただいたが、本システ ムのより詳細については参考文献をご参照いただきた い。



図4.周波数40 kHz、振幅3 mAの交流変調 電流を印加した際に観測された周辺 磁場分布

【参考文献】

- [1] H. Murakami, M. Tonouchi, "High-sensitive Scanning Laser Magneto-Optical Imaging System" Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 13701.
- [2] H. Murakami, K. Ueno, I. Kawayama, M. Tonouchi, "Development of a prototype laser magneto-optical imaging system" Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) 941.
- [3] H. Murakami, R. Kitamura, I. Kawayama, M. Tonouchi, "Magneto-optical detection of single flux quantum signals in superconducting quantum interference device "Appl. Phys. Lett. 95 (2009) 192503