

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360159

研究課題名 (和文) 高機能磁気デバイスのための高速・高感度光検出システムの開発

研究課題名 (英文) Development of a high-speed and high-sensitive optical output system for high-performance magnetic devices

研究代表者

村上 博成 (MURAKAMI HIRONARU)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授

研究者番号：30219901

研究成果の概要 (和文)：超伝導磁束量子デバイスをはじめとする磁気デバイスの評価装置および光出力インターフェイスとして、高感度・高速レーザー走査型磁気光学顕微鏡システムの間発を行った。このシステムを用いて、デバイス中の磁束分布の高速観察 (感度 $\sim 100\mu\text{T}$)、および超伝導ループ中に発生した単一磁束量子の信号検出に成功した。また交流変調法を利用することにより、僅か 1mA の電流によって発生する磁場分布の観察にも成功した。

研究成果の概要 (英文)：A high-speed and high-sensitive laser scanning magneto-optical microscope has been developed as a diagnostic apparatus and an optical output interface for magnetic devices. Using this system we have succeeded in the fast and quantitative imaging of a magnetic field distribution in superconductor devices with a sensitivity of $\sim 100\mu\text{T}$, and also succeeded in the detection of a single flux quantum generated in a superconducting loop. Furthermore, we succeeded in the imaging of weak magnetic field distribution around superconducting strip-line applied with a current as small as $\sim 1\text{mA}$ by means of ac-modulation technique.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2009 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：磁気光学効果、磁束量子、磁気デバイス、超伝導磁束量子デバイス、レーザー、交流変調法、高温超伝導体、高温超伝導テープ線材

1. 研究開始当初の背景

近年、量子コンピュータのための超伝導磁束量子ビットデバイスや単一磁束量子 (SFQ) 論理回路など、次世代情報化社会の確立において有用な超伝導デバイスの研究開発が盛んに行われている。このような超伝導デバイスから信号を取り出す場合、特に高周波信号を扱う場合、常伝導回路との接続におけるインピーダンス・ミスマッチングなどによる信号損失が問題となるが、光を使った光出力イン

ターフェイスを利用すれば、このような問題を解消できる可能性がある。

また、このような超伝導デバイスの実用化においては、デバイスの故障個所などの評価システムの開発が重要となるが、実際にデバイスにドライブ電流 ($\sim 1\text{mA}$) を流した際に発生する磁場の分布パターンから故障個所を特定できる可能性がある。

超伝導の応用上重要な、これら超伝導磁束量子デバイスをはじめとする磁気デバイス中

の磁気シグナルを検出・評価可能な装置として、高速・高感度光検出システムの開発に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究では、超伝導磁束量子デバイスをはじめとする一般的な磁気デバイスの評価や動作モニタリング装置として、また磁気デバイスの光出力インターフェイスとして、磁気光学ファラデー効果を利用した高速・高感度光検出システムの開発を目的とする。

このため、以下のような仕様を有するレーザー走査型磁気光学顕微鏡の開発を行う。

- 超伝導デバイスの光出力インターフェイスとして、平均化や積算などの処理なしで単一磁束量子信号を高速に検出可能であること。
- 超伝導体をはじめとする磁気デバイス、の磁束分布状態を磁気検出感度 100 μ T (マイクロテスラ) 程度で高速に観察可能であること。
- 超伝導デバイスの故障評価装置としての応用を考慮し、交流変調法を利用して数 mA 程度の電流によりデバイス中に発生する数 μ T 程度の磁場分布の観察が可能であること。

3. 研究の方法

(1) 磁気光学ファラデー効果および従来の磁気光学顕微鏡

光と磁気の相互作用により光の偏光面が旋光する効果は一般に磁気光学効果としてよく知られており、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) θ_F は以下の式によって与えられる。

$$\theta_F = VtH \quad (1)$$

ここで、 V は光が通過する磁気光学材料 (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、 θ_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。

このような磁気光学ファラデー効果を利用して磁束分布の観察を行う顕微鏡に磁気光学顕微鏡がある。磁気光学顕微鏡の特徴としては、

- 分解能として用いる光の波長程度を見

込めること

- 基本的に試料面が平滑であればどのような試料にも利用できること
- 外部からの磁場印加で超伝導体中の磁束侵入の観察が可能で、非破壊検査装置への発展が期待できる

などがあり、超伝導磁束量子デバイスなどの磁気デバイス中の磁束状態を評価する装置として有用である。

(2) 高感度レーザー走査型磁気光学顕微鏡システムの開発

本研究で構築したシステムを図 1 に示す [1]。

このシステムでは光源として空冷式の Ar レーザーから出射される波長 514nm のレーザービームを使用する。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 (グラントレープリズム: 消光比 10⁻⁶) 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

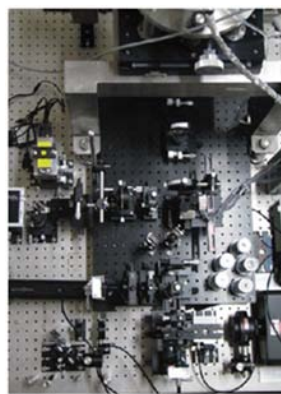
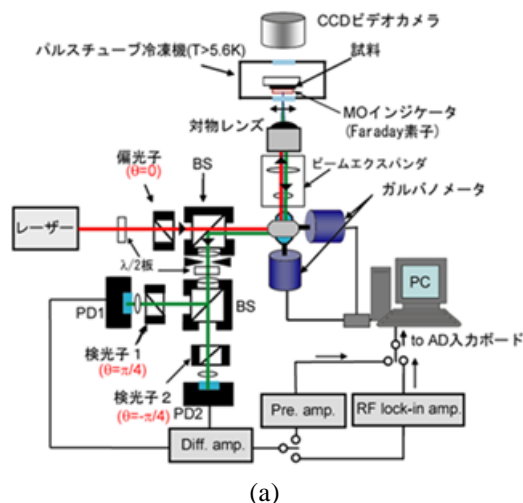


図 1. 構築した高感度レーザー走査型磁気光学顕微鏡の (a) システム概略図と (b) 写真。

レンズの間のレーザービーム走査光学系はビームエキ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 $1\mu\text{m}$ 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いるが、超伝導デバイス内の特定の局所領域でレーザー照射位置を固定して連続的に信号検出を行う際の位置精度の目安として非常に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 1mW 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 (ビスマス置換型希土類鉄ガーネット膜) が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入射レーザー光が反射してくる。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光の偏光面がファラデー効果によって旋光することになる。なお、この際試料とファラデー素子間に隙間があると、空間分解能の低下や感度の低下を引き起こすため、このシステムでは、ファラデー素子はスプリングによって試料表面に密着して押しつけられるような機構を取り付けている。

磁気光学顕微鏡では、この θ_F 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 $E\sin\theta_F$ (E は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 $E^2\sin^2\theta_F \sim \theta_F^2$ (ただし、 $\theta_F \sim 0$)、すなわち磁場強度の 2 乗に比例したものになってしまう。よってこの出力値から直接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 10^{-6} を持つ偏光子、検光子のペア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 10^{-6} 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、我々が有機金属分解 (MOD) 法により作製した $1.4\mu\text{m}$ 厚のもので約 $3 \times 10^{-5} \text{rad}/0e$ 程度であり [2]、これを仮に $10^{-4} \text{rad}/0e$ にしたとしても、 $10^0 e$ (エルステッド) (= 1mT) 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なってしまいうため信号の検出が難しい。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過して戻ってくるが、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 $(E^2/2)\sin 2\theta_F \sim 2\theta_F$ (ただし、 $\theta_F \sim 0$) 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。

実際の高速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 $2\mu\text{s}$ もしくは $10\mu\text{s}$ 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 ピクセルの観察時で約 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。

また、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である。これは従来の CCD を使った 2 次元画像取得法では不可能な手法で、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。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。

この構築したシステムの評価を行うため、超伝導磁束量子デバイス中の磁束分布の高速または高感度観察、および光出力インターフェイスとしての適用可能性について評価を行った。

(3) ファラデー素子について

本研究では磁気光学効果の大きなビスマス置換イットリウム鉄ガーネットの多結晶膜と単結晶膜をファラデー素子として準備した。

単結晶膜は一般に液相成長法により作製するため表面が原子レベルで平坦で、 $1\mu\text{m}$ 以下の空間分解能が期待できるが、面内方向に容易磁化方向を持った単結晶ガーネット膜の作製は困難で、低温では自発磁化現象によりガ

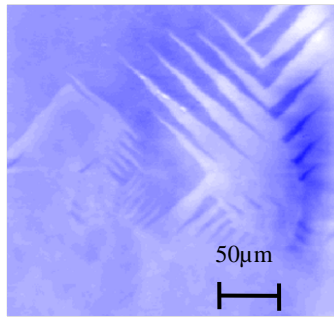


図 2. 温度 30K でのビスマス置換イットリウム鉄単結晶ガーネットの自発磁化による磁区構造。

ーネット自体の磁区構造が出現することがよくある。実際今回使用した単結晶ガーネット膜（膜厚 10 μm ）においても一部の領域において自発磁化による磁区構造が観察された（図 2 参照）。よって高分解能観察においては容易磁化方向が完全に面内に配向した良質な単結晶ガーネット膜を今後入手する必要がある

一方、多結晶膜は有機金属分解法（MOD 法）により独自に作製した膜厚 1.4 μm のものを使用した。この方法の特徴としては、塗布する回数によって希望する膜厚のものを作製可能なこと。また多結晶であるため各微結晶の容易磁化方向はランダムに向いておりガーネット自体の磁区ドメイン構造が現れにくいことなどがあげられる。ただ、ガーネット内部の粒界や表面の凹凸によって直線偏光光が乱反射され、磁気光学顕微鏡測定の際これがノイズの要因になってしまう。

今回使用したビスマス置換イットリウム鉄ガーネットは光通信に利用される波長 1.56 μm の光に対して吸収が極端に少なく、かつヴェルデ定数がある程度大きいという特徴がある。その特性としては、波長が短くなるにつれてヴェルデ定数は大きくなるが、その一方で吸収も大きくなってしまふ。そのため今回の実験では、吸収による信号強度の低下を考慮し MOD 法により作製した多結晶ガーネット膜（厚み 1.4 μm ）を使用した。

4. 研究成果

(1) 超伝導デバイスを使った磁束分布の高速観察

構築したシステムの特徴として、磁束の空間分布をその方向も含めて定量的に観察評価することが可能である。図 3 に高温超伝導体 YBa₂Cu₃O_{7- δ} (YBCO) 薄膜ストリップライン（線幅 300 μm 、膜厚 200nm）に直流で 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。また、電流を 3 倍にすることによって発生する磁場の大きさもほぼ 3 倍になっている様子が確認できる。なお、この磁気光学イメージは 500 \times 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 2 μs 毎の瞬時データを取り込むことにより行った。よって全体のイメージ取得に要した時間は約 1 秒である。

このシステムの磁気検出感度としては、レーザービームを固定して室温試料の局所領域でシグナル検出を行った場合、平均化などの処理を一切行わない条件下でも約 5 μT を達成している[1]。しかしながら、図 3 の挿入ラインに沿った磁場分布から得られる感度は精々数 100 μT 程度となっている。これは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こと。またこの測定で使用した多結晶のガーネット膜内部に存在する結晶粒界等で光が乱反射される影響が大きく効いているものと考えられる。

(2) 超伝導デバイス中の局所シグナルの高速・高感度検出

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検出であるが、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し、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することにより局所的な磁気シグナルを連続的に観察すること

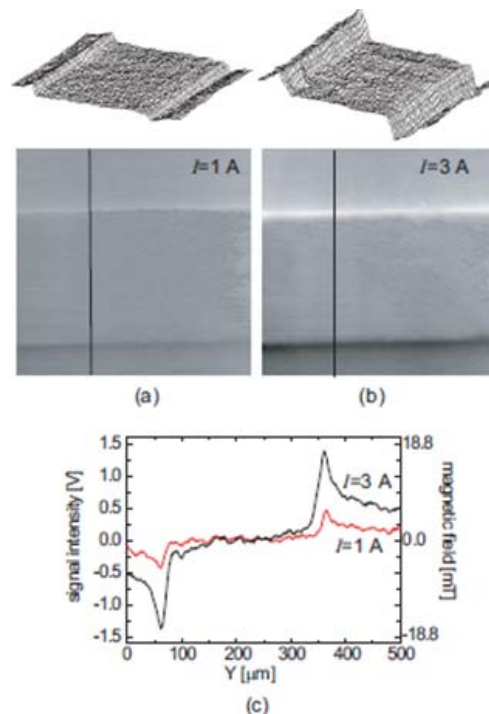


図 3. YBCO ストリップラインに電流を印加した際に発生する磁場分布。(a)電流 1A 印加時。(b)電流 3A 印加時。(c)各挿入ラインに沿った磁場分布。

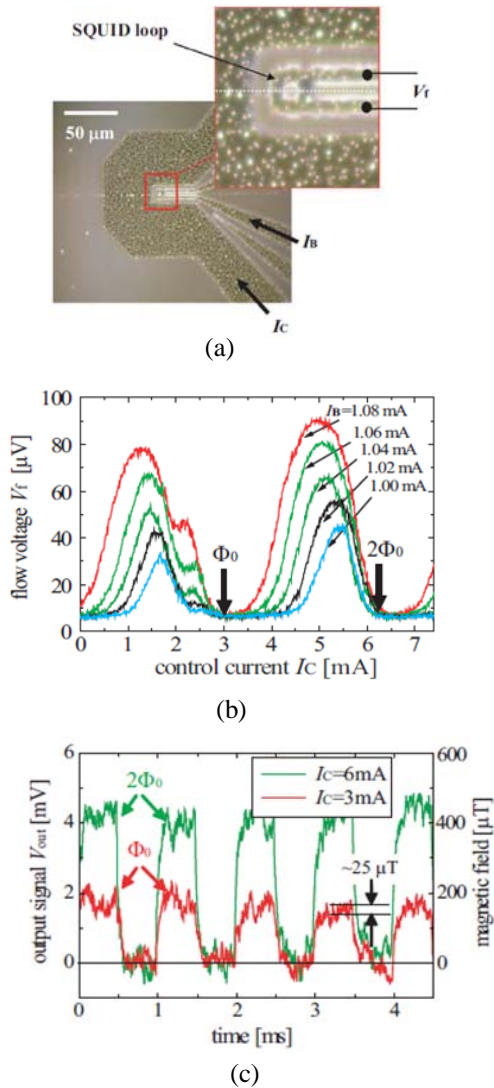


図 4. (a) MgO バイクリスタル基板上に作製した単一 SQUID を有する YBCO ジョセフソン・ボルテックスフロー型トランジスタ (YBCO-JVFT)。 (b) YBCO-JVFT のコントロール電流-フロー電圧特性。 (c) コントロール電流ラインにパルス電流を印加した際の SQUID ループ内の磁気シグナル。

が可能である。その一例として図 4 に単一の超伝導量子干渉計 (SQUID) を有する YBCO ジョセフソン・ボルテックスフロー型トランジスタ (YBCO-JVFT) を使った実験結果を示す[3, 4]。測定では、図 4a に示すような $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ 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 I_c を印加し SQUID ループ内にレーザービームを固定した状態でこのループ内に発生する磁束の観察を連続的に行った。図 4b はこのデバイスのコントロール電流-フロー電圧特性を示しているが、コントロール電流 I_c を約 3mA 増すごとに 1 つの磁束量子が SQUID ループ内に発生していることがわかる。即ち、 $I_c=3\text{mA}$ 、 6mA でループ内にそれぞれ 1 個、2 個の磁束量子が

発生していることを示している。

このデバイスを用いて、コントロール電流ラインに 3mA および 6mA のパルス高をもつ電流を印加した際のループ内の磁気シグナルの変化を図 4c に示す。ループ内に発生する 1 個および 2 個の磁束量子に対応して磁気シグナルが変化している様子がわかる。

この結果は、超伝導ループ内に発生する単一磁束量子シグナルの高速光検出に初めて成功したことを示している。

このような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。現在使用している差動増幅器の帯域は 30MHz であり、この速度であれば超伝導磁束量子ビットの光出力インターフェイスへの応用は可能と考えられるが、SFQ 論理回路の光出力インターフェイスへの応用は難しい。

この点については、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さらに進めることにより少なくとも数 GHz 程度の高速信号の取り扱いが可能になるものと考えている。

(4) 交流変調法による高感度磁束分布観察
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り、より高感度な磁束分布イメージングができるのも大きな特徴の一つである。

この交流変調法を使って図 4a に示すデバイスに対し、コントロール電流ラインに周波数 40kHz の変調交流電流を印加した際に発生する交流磁場の分布を観測した。結果を図 5 に示す。従来の直流電流を印加した際の磁束分布観察では数 100mA 程度の電流を流さない

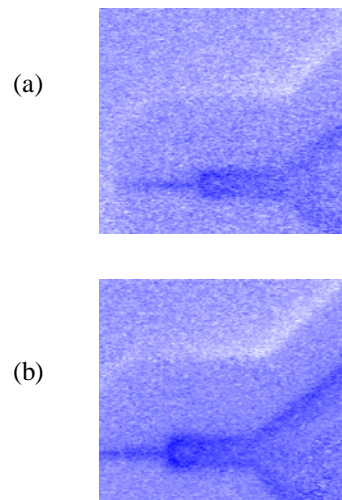


図 5. YBCO-JVFT のコントロール電流ラインに交流電流 (@40kHz) を印加した際に発生する磁束分布の交流変調法による観察。(a) 電流振幅 1mA、(b) 電流振幅 2mA 時。

と観測されなかった磁場分布が、ここに示すように僅か1 mAの電流でも観測可能であることがわかった。さらに詳細に見ると、ライン括れ付近に集中した磁束やジョセフソン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。

この結果は、将来的に超伝導の集積デバイスなどが開発された際、通常のドライブ電流程度でデバイス内の磁束分布観察が可能であることを示しており、そのようなデバイスの故障評価装置としても利用可能であることを示している。

【参考文献】

- [1] H. Murakami, M. Tonouchi, Rev. Sci. Instrum. 81(2010) 13701.
- [2] H. Murakami, K. Ueno, I. Kawayama, M. Tonouchi, Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) 941.
- [3] H. Murakami, R. Kitamura, I. Kawayama, M. Tonouchi, Appl. Phys. Lett. 95(2009) 192503.
- [4] R. Kitamura, H. Murakami, I. Kawayama, M. Tonouchi, IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 745.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ①村上博成 “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察” 大阪大学低温センター便り, 査読無, **153** (2011) 24.-28
- ②H.Murakami, M.Tonouchi, High-sensitive Scanning Laser Magneto-Optical Imaging System, Rev. Sci. Instrum., 査読有, **81** (2010) 013701-013707
- ③H.Murakami, R.Kitamura, I.Kawayama, M.Tonouchi, Magneto-optical detection of single flux quantum signals in superconducting quantum interference device, Appl. Phys. Lett., 査読有, **95**(2009) 192503- 192505
- ④H.Murakami, R.Kitamura, I.Kawayama, M.Tonouchi, Development of a high-speed and a high-sensitive laser scanning magneto-optical imaging system, Journal of Physics: Conf. Ser., 査読有, **150** (2009) 012029-012033
- ⑤R.Kitamura, H.Murakami, I.Kawayama, M.Tonouchi, Detection of Magnetic Signal in High-Tc Superconductor Devices by Scanning Laser Magneto-optical Microscope, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, **19** (2009) 745-748

[学会発表] (計24件)

- ①【招待講演】村上博成, 磁場変調磁気光学法による高温超伝導デバイス中の磁束観察, ワークショップ:ナノ構造超伝導体における渦糸状態, 2011.1.28,大阪府立大学
- ②H.Murakami, K. Takahashi, M.Tonouchi, High-sensitive magneto-optical imaging of high-Tc superconductors using ac-modulation method, International Symposium on Superconductivity 2010, 2010.11.5, エポカルつくば
- ③H. Murakami, K. Takahashi, I. Kawayama, M. Tonouchi, Development of a High-sensitive Laser Magneto-optical Imaging System for Magnetic Devices, 17th International Workshop on Oxide Electronics, 2010.9.21, 淡路夢舞台
- ④【招待講演】村上博成, レーザー磁気光学顕微鏡の開発と応用, 日本学術振興会超伝導エレクトロニクス146委員会第87回研究会, 2010.4.22, 東京・学士会館本館
- ⑤【招待講演】村上博成, 磁束量子の光検出, 日本物理学会第65回年次大会, 2010.3.21, 岡山大学
- ⑥ H. Murakami, R. Kitamura, I. Kawayama, M. Tonouchi, Magneto-optical detection of a single magnetic flux quantum in high-Tc superconductor devices, The 9th European Conference on Applied Superconductivity, 2009.9.15, ドイツ・ドレスデン
- ⑦H.Murakami, R.Kitamura, I.Kawayama, M.Tonouchi, Development of a Low Temperature Scanning Laser Magneto-optical System, 25th International conference on Low Temperature Physics, 2008.8.12, オランダ・アムステルダム

[その他]

ホームページ等

<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/thp/people/murakami/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 博成 (MURAKAMI HIRONARU)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授
研究者番号: 30219901

(2) 研究分担者

川山 巖 (KAWAYAMA IWAO)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助教
研究者番号: 10332264