

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287069

研究課題名(和文)量子ホール電子系の空間・時間分解計測によるスピンドYNAMIKSの解明

研究課題名(英文) Investigation of the electron and nuclear spin dynamics in quantum Hall regime by spatial and time resolved magneto-optical Kerr measurement

研究代表者

音 賢一 (Oto, Kenichi)

千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30263198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：希釈冷凍機温度で動作する高感度Kerrイメージング測定系を作製し0.5 K以下での電子スピン偏極および量子ホール・ブレイクダウン電流が引き起こす動的核スピン偏極とその緩和現象のダイナミクスについて、時間分解計測・空間分解計測で調べ、量子ホール・ブレイクダウン電流の分布に関する知見を得た。また、GaAs量子井戸2次元電子系に加え、GaAs/AlGaAs単一ヘテロ接合HEMT試料での電子スピン偏極の計測をSagnac干渉計を用いて行い、ランダウ占有数3付近でのフェルミ準位の状態を光学的計測により鋭敏に検出可能であることを示した。さらに、エッジ状態に対する光渦照射による伝導度変化について調べた。

研究成果の概要(英文)：We developed the magneto-optical Kerr rotation imaging system operating below 0.5 K by using dilution refrigerator to investigate the electron spin polarization in quantum Hall (QH) regime. The dynamic nuclear polarization (DNP) by the QH breakdown current and the dynamics of DNP relaxation were studied by means of the spatial and time resolved Kerr rotation measurements. The spatial pattern of the QH breakdown current can be imaged as a DNP distribution profile. We also investigated the electron spin polarization in GaAs/AlGaAs HEMT structures, where the extent of Kerr rotation angle is negligibly smaller than that in the quantum well structures, by using Sagnac interferometer. We confirmed the electron spin polarization at the filling factor 3 can be evaluated by the Kerr rotation measurement with the electron density modulation. We also studied the electron transport near the edge channels in QH regime under the optical vortex irradiation.

研究分野：物性実験

キーワード：量子ホール効果 スピン Kerr回転 核スピン偏極 イメージング

## 1. 研究開始当初の背景

GaAs/AlGaAs 系などの純良な 2 次元電子系の極低温・強磁場における量子ホール効果では、ランダウ量子化により非圧縮性電子状態となりポテンシャル遮蔽の消失と強い電子相関による様々な多体効果が顕著に現れる。整数量子ホール系の電子スピン状態は主にランダウ準位占有数により偏極・非偏極が決まるものと考えられるが、現実の半導体 2 次元電子系試料中ではイオン化不純物からの空間的にランダムなポテンシャルの揺らぎや核スピン偏極の分布などにより、偏極度の異なるドメインが分布[1, 2]している。

巨視的な量子効果の一つである量子ホール状態では、試料内部の電流分布の如何によらず正確な量子化ホール抵抗が観測される。しかし、実際には電流分布や局所的な電子スピン状態の分布が量子ホール効果における電気伝導の性質を大きく左右しているものと考えられ、それらのメカニズムの解明には空間分解した計測が必要であると強く認識されている。例えば、小宮山グループ[3]、岡本グループ[4]らによる電気伝導と遠赤外サイクロトロン発光イメージングによる伝導機構の研究や、von Klitzing のグループで行われた AFM 等の微小プローブを用いた電位分布計測の研究[5]等により、整数量子ホール効果の電流分布や励起電子の空間分布に関する知見が得られ、特にブレイクダウン現象の機構の解明が飛躍的に進んだ。その一方で、量子ホール 2 次元電子系のスピン偏極の空間分布に関しては、後述のように直接観測が実験的に困難であるため、現状ではほとんど報告が無い。特に、分数量子ホール状態では電子スピンとの相互作用による核スピンの偏極とそれに伴う大きな抵抗増大現象や、多数の電子スピンの関わるスカーミオン励起などに代表される「空間分布を示す物理現象」が電気伝導に大きな影響を与えている。この電子スピンや核スピンは光や電流などによる励起に反応して偏極や緩和をするとともに、このスピン偏極自身が電流分布などに影響を与えるため時間変化を示す非平衡系であり、そのダイナミクスの解明は量子ホール電子系の理解に不可欠の重要な知見となる。

## 2. 研究の目的

我々は、これまで量子ホール効果の非局所伝導、エッジ状態のキャパシタンスによる空間分布、ポッケルス効果による電位分布などの方法で量子ホール系の伝導機構を調べてきた。Pockels 効果による電位分布[6]や Kerr 効果による電子スピン偏極度のイメージング[7]を行い量子ホール状態のスピン偏極電流の空間分布についての実験研究を行い、量子ホール・ブレイクダウンと電流分布についての知見を得るとともに、低温・強磁場でのイメージング法に関する多くのノウハウを得た。また、量子ホール電子系のスピン偏極

とダイナミクスについて時間分解 Kerr 回転計測の手法により研究を進め、円偏光励起した 2 次元電子 1 層の量子ホール電子系でもスピン緩和時間  $T_1, T_2^*$ 、 $g$  因子を同時に計測でき核スピン偏極の影響[8]やスカーミオン励起による緩和などの詳細が調べられることを示した[9]。本研究では、スピンイメージングを高感度・高分解能化するとともに、低温強磁場での「時間分解 Kerr 回転の試料上でのマッピング」を実現することで量子ホール電子系および関連して励起される核スピンの偏極に関連するダイナミクスとその空間分布について調べることを目的とする。特に、量子ホール・ブレイクダウン電流による核スピン整列とその緩和の時間・空間分解計測、量子ホール状態でのスピン偏極状態の空間分布とその電流による変化とその拡散・緩和の動的過程、について明らかにすることを目指し、量子ホール状態における電子スピン偏極が電気伝導に及ぼす効果とその機構について調べる。また、主に対象にする GaAs 系 2 次元電子系以外の電子スピン・核スピン偏極の生成と検出についても探索する。

## 3. 研究の方法

(1) 希釈冷凍機温度で動作する高感度・高安定 Kerr イメージング測定系の製作  
希釈冷凍機温度での量子ホール効果の磁気光学 Kerr 回転の計測では、測定用の励起光による温度上昇を極限まで低減することが重要である。また、位置分解能の向上のため光スポット径を小さくすると励起光密度が高くなるため入射光の強度を下げる必要がある。このため Kerr 効果の高感度化が必須である。さらにイメージング計測では光スポットを走査するため測定時間が長くなるが、条件をそろえた S/N の良好な像を得るためにはノイズの低減とシステムの高い時間安定性も必要となる。本研究では 12 T の磁場下で 0.5 K 以下で長時間安定に動作する希釈冷凍機を用いた高感度・高安定 Kerr イメージング測定装置を製作する。また、さらなる高感度化のため、サンヤック干渉[10]を用いた光磁気 Kerr 測定システムの改良を行い、微小な回転角の検出を可能とする。

## (2) 光磁気 Kerr 回転の空間・時間分解計測

量子ホール効果のブレイクダウン電流により局所的に原子核スピンの偏極[11]される現象が川村らにより報告されている。ブレイクダウン電流の分布に沿って動的核スピン偏極が生じれば、それにより有効ゼーマンエネルギーが変化して電子スピン偏極度が影響を受けるはずである。これを検証しブレイクダウン電流や核スピン偏極の分布とその緩和を光磁気 Kerr 回転の計測を通じて可視化する。また、ブレイクダウン電流の空間分布について様々な試料構造で調べ、電子濃度ゆらぎの大きさや空間分布との相関を検討して、ブレイクダウン臨界電流付近で知られ

ている電流-電圧特性の時間的な不安定性等の現象と、スピン偏極のドメイン構造の時間的変動との相関等を調べる。

### (3) 時間・空間分解スピンイメージングの応用

これまでの実験結果を基に、本手法を GaAs/AlGaAs 量子井戸 2 次元電子系以外の試料のスピン計測にも適用する。スピントロニクス関連の研究で用いられる希薄磁性半導体量子井戸や磁性絶縁体などのスピン偏極の検出や制御の可能性を調べる。特に、パルスレーザーを用いた時間分解 Kerr 回転および円二色性吸収の計測とスピンの歳差運動の解析から、核スピンによる有効磁場、有効 g 因子、スピン緩和等について調べる。

## 4. 研究成果

### (1) 希釈冷凍機温度で動作する高感度・高安定 Kerr イメージング測定系の製作

①本研究の推進に必要な温度 0.5 K 以下で長時間安定して光磁気 Kerr 効果が計測可能で、測定スポットをサブミクロンの精度で設定できる計測系を構築した。本科研費により 12 T の超伝導電磁石・デューアを導入し、既存の小型希釈冷凍機およびピエゾポジショナーによる位置決めと、光ファイバーによる光導入・取出し、試料直近に置かれた小型光学素子による偏光解析などの工夫により、光励起下で温度 0.4 K 程度での Kerr 回転を計測できるシステムとした (図 1)。光スポットのサイズは、ナイフエッジ法の計測で約  $5 \mu\text{m}$  程度で試料上を走査することで全体のイメージングも可能である。超伝導電磁場をパルスモードにすることで、1 日以上連続した長時間のイメージングや時間分解計測も可能である。

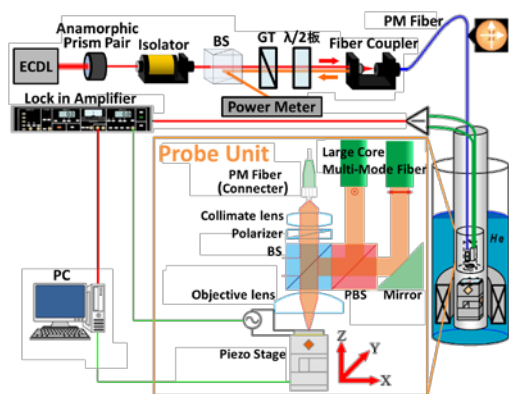


図 1 製作した極低温下 Kerr 回転計測系

②サニャック干渉計を光磁気 Kerr 回転の測定に用いた計測系を製作・改良して、HEMT 構造の 2 次元電子系試料での Kerr 回転の計測を行った。プロトタイプとしてすでに製作していたサニャック・Kerr 回転測定系では HEMT 試料での微小な Kerr 回転はバックグラウン

ドのノイズに埋もれて明瞭に検出できなかったが、本研究では光学系の小型化による高剛性化、E0 変調器への変調電圧・変調周波数の最適化、試料へバックゲートを加工して電子濃度変調による Kerr 回転信号のロックイン検出、等の改良・工夫を行い (図 2)、大幅にノイズレベルを下げることに成功し HEMT 試料での計測を可能にした (後述)。

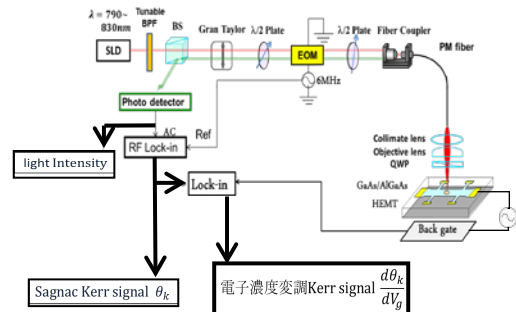


図 2 サニャック干渉計を用いた光磁気 Kerr 回転測定系

### (2) Kerr 回転測定 of 空間・時間分解計測

希釈冷凍機温度で動作する高感度 Kerr イメージング測定系を用いて 1 K 以下の電子スピン偏極および量子ホール・ブレイクダウン電流が引き起こす動的核スピン偏極とその緩和現象について、時間分解計測、空間分解計測を行ってブレイクダウン電流の分布に関する知見を得た。本研究ではランダウ準位占有数 1 の量子ホール効果においてブレイクダウン電流に沿って動的核スピン偏極 (DNP) が生じる [11] とき、DNP により電子系の有効ゼーマンエネルギーが変化して電子スピン偏極度が影響を受けることを検証した。GaAs 2 次元電子系の場合、DNP が生じることで有効ゼーマンエネルギーは小さくなり電子スピン偏極度が小さくなり、Kerr 回転を示す信号が著しく減少する。ブレイクダウン電流を切ると、DNP が徐々に緩和するにつれて電子スピン偏極度も回復し、Kerr 回転の大きさも戻る (図 3)。これをもとに、Kerr 回転の実験から DNP の生成・緩和に関する情報や、その元となるブレイクダウン電流がどこを流れていたかということ空間分解 (測定位置を走査) することにより調べた。

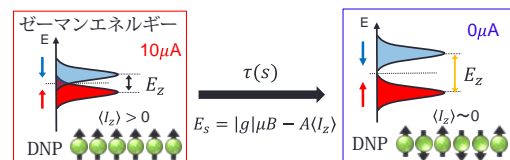


図 3 左図は DNP により超微細相互作用を通じて電子系のゼーマンエネルギーが小さくなる (GaAs 系) 様子。DNP の緩和とともに電子系のゼーマンエネルギーも元の GaAs での値に戻る (右図)。

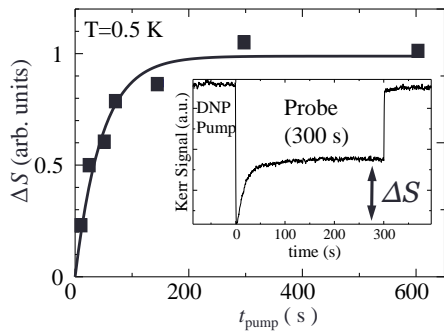


図4 ブレークダウン電流を流す時間、すなわち DNP のポンピング時間と Kerr 回転信号の変化量  $\Delta S$

図4の挿入図はブレークダウン電流 ( $10 \mu\text{A}$ ) を 300 秒間流して切った後、300 秒間 Kerr 回転信号を計測したもので、数十秒程度の緩和時間を示しており、ブレークダウン電流により DNP が励起され、緩和する様子が見て取れる。この Kerr 回転信号の時間変化分を  $\Delta S$  とすると、これは Kerr 回転を測定している光スポット内におけるブレークダウン電流による DNP の生成量に当たるものと考えられる。図4はこのブレークダウン電流を流す時間  $t_{\text{pump}}$  を変えたときの  $\Delta S$  を見積もったものである。DNP の緩和時間の程度以上ブレークダウン電流を流すことで生成する DNP は飽和している様子がわかる。

測定的光スポットの位置を走査することで試料内におけるブレークダウン電流による DNP の分布、すなわち、ブレークダウン電流がどこを流れていたのかを明らかにすることができる。図5は試料端からの距離  $x$  の位置 (図5挿入図参照) における  $\Delta S$  をプロットしたものである。試料端の  $1 \mu\text{m}$  程度の極近傍でのみ DNP が観測されていることがわかる。すなわち、この実験条件 (占有数 1.03、電流が数マイクロアンペア) においてはブレークダウン電流のほとんどが試料端に沿って流れていることがわかる。また、電流を僅かに増すと ( $5 \rightarrow 8 \mu\text{A}$ ) 試料内部にも DNP の生成が広がっていく様子が見られる。ブレークダウン電流による DNP で電流の流れている部分のゼーマンエネルギーが縮小することで、よりブレークダウンが生じやすくなる、

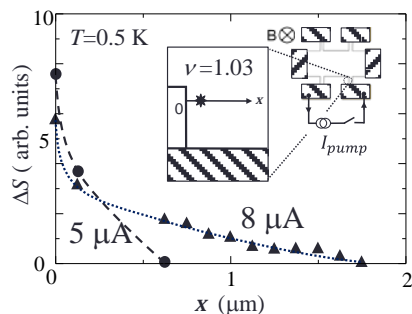


図5 測定位置の試料端からの距離  $x$  と Kerr 回転の変化量  $\Delta S$ 。試料端の極近傍でのみ DNP が観測された。

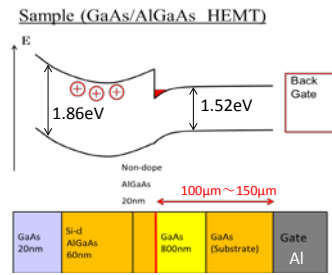


図6 変調ドーパ GaAs/AlGaAs ヘテロ接合 (HEMT) のエネルギー模式図。下図は構造の例

すなわち、ブレークダウン電流の空間分布の自己安定化 (ピン止め) のような効果が生じていることが考えられる。また、本実験での手法により、ブレークダウン電流の (流れた跡の) 空間分布をイメージングすることも可能になると考えられる。

(学会発表①⑥⑦、他4件)

### (3) GaAs HEMT 構造 2次元電子系の光磁気 Kerr 効果による電子スピン偏極度の計測

本研究で主として用いた 2次元電子系は GaAs 量子井戸構造の試料である。2次元電子系 1 層の電子スピンの磁化による光磁気 Kerr 回転角は典型的な条件で  $10^{-5}$  rad 程度と極めて微小であるため、測定に用いる光のエネルギーを、GaAs 量子井戸の吸収エネルギーの極近傍 (低エネルギー側) に慎重に合わせることで、Kerr 回転角の増強効果を用いて感度を上げて測定している。一方で、変調ドーパ GaAs/AlGaAs ヘテロ接合 (HEMT) の 2次元電子系はデバイスとしても広く利用される様々な電子濃度、易動度の試料が入手可能であり、様々な研究領域で活用されている。しかし、電子系が閉じ込められているヘテロ接合では価電子帯側には閉じ込めポテンシャルが無く、正孔側に明確な量子準位が無いために量子井戸構造のように光吸収エネルギー近傍での Kerr 回転角の増強効果を利用できない (図6)。すなわち、測定すべき Kerr 回転角が極めて小さく測定が困難なため、これまで HEMT 構造での量子ホール状態での光磁気 Kerr 効果の報告は無かった。本研究では上記 (1) で開発したサニャック干渉計を用いた高感度 Kerr 回転計測系を用いて、HEMT 構造での電子スピン偏極度の計測を行った。図7はランダウ準位占有数 3~4 付近で励起波長を 800 nm~817.5 nm まで 0.5 nm 毎に測定した結果で、左図が Kerr 回転角に比例した信号、右図が電子濃度変調 (変調度 1%以下) してロックイン検出した信号である。測定された左図の Kerr 回転角の奇数占有数 3 と偶数占有数 4 に電子スピン偏極の有無による変化は直接見られず、光磁気吸収によるランダウ・ファンが観測されているだけであった。一方で、右図の電子濃度変調による検出では、占有数 3 において特定の波長 (磁気光吸収の観測される波長) のところで明瞭な信号が検



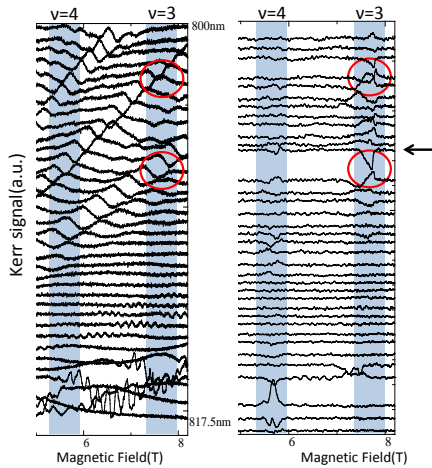


図7 HEMT 試料で計測された Kerr 回転(左)、電子濃度変調で得られた信号 (右)

出された。これは、奇数占有数の量子ホール状態において、ゼーマンエネルギーが交換相互作用によりエンハンスされること、すなわちフェルミ準位におけるスピギャップの大きさが、上位のランダウ準位のスピギャップの大きさにも反映し、その光磁気吸収の信号を検出していることが分かった。本研究では、この手法を光スポットを試料上で走査することにより GaAsHEMT 試料における局所電子濃度 (信号の検出される磁場値)、有効  $g$  因子の場所依存性 (信号強度、磁場幅) をマッピングできることを明らかにした。(学会発表②、他 3 件)

(4) 光渦照射による量子ホール電子系の伝導度変化  
 近年研究が進展している「光渦」照射による量子ホール電子系への効果について新たに調べた。らせん状の等位相面をもつ光渦は、中心軸に電場ゼロの特異点を有し、その周りの放射状電場や中心軸を周回する方向の回転電場が発生するカイラリティを持った光であり、光の軌道角運動量を有する特異な電磁波である。光渦による電子励起において、光渦の持つ角運動量が電子系に与える影響については未解明で、特に電子系自身がカイラリティを持つ量子ホール系に対する光渦による電子励起では、その物性に光渦の特性が強く反映する可能性がある。波長可変 CW レーザを光源とし、空間位相変調器によるホログラム投影法で光渦を生成し量子ホール状態にある 2 次元電子系試料

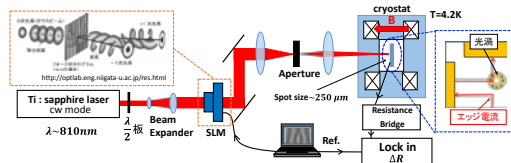


図8 光渦生成と抵抗変化測定系

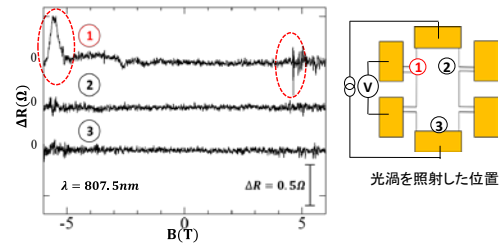


図9 試料上 3 か所で調べた光渦照射による抵抗変化  $\Delta R$ 。試料端①に光渦が当たっている時にだけ変化が観測された。

表面に集光して照射した (図 8)。このときホログラムパターンを周期的に変化させてそのときの抵抗変化分  $\Delta R$  をロックイン検出した。図 9 に試料上の 3 か所に光渦を照射したときの抵抗変化を示す。光渦を試料端①に照射したときのみ、特定の磁場位置で抵抗変化が現れ、バルク部分②や電極の境界③に照射しても変化は観測されなかった。このことから、光渦と試料端のエッジ状態との相互作用で抵抗変化が生じている可能性が高いものと考えられる。(学会発表③、他 1 件)

(5) GaAs 試料以外での電子スピン偏極の検出と制御を目指して以下の研究を行った。

①CdTe/CdMnTe 希薄磁性量子井戸を対象に時間分解 Kerr 回転測定による有効  $g$  因子の温度変化の組成依存性を詳細に調べた。(発表論文②)

②ErFeO<sub>3</sub> の光誘起スピン配列の THz 磁場による制御に関する研究で、スプリットリング構造 (メタマテリアル) による磁場増強効果を用いてスピンの制御を行った。(発表論文③④、学会発表④⑧、他 1 件)

③核スピン偏極 <sup>3</sup>He ガスの直接生成とその利用に関する研究で、希薄 <sup>3</sup>He ガス中で高周波放電による電子励起下で円偏光共鳴光を照射し、相互作用を通じて核スピン偏極を生じさせ NMR 法で検出した。(学会発表⑤⑨)

<引用文献>

[1] S. Kronmuller, et al., Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 2526.  
 [2] K. Hashimoto, et al., Physica **B298** (2001) 191.  
 [3] K. Ikushima, et al., Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 146804.  
 [4] Y. Kawano, et al., Appl. Phys. Lett. **84** (2004) 1111.  
 [5] E. Ahlswede, et al., Physica **B298** (2001) 562.  
 [6] M. Dohi et al., Int. J. Modern Phys. **B 21** (2007) 1414.  
 [7] K. Oto, et al., Int. J. Modern Phys. **B,**

23 (2009) 2750.

- [8] D. Fukuoka, et al., Phys. Rev. **B77** (2008) R14824.  
[9] D. Fukuoka, et al., Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 126802.  
[10] J. Xia, et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 167002 (2006).  
[11] M. Kawamura, et al., Phys. Rev. **B78**, 041304 (2006).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① C. Chuang, M. Matsunaga, Fan-Hung Liu, Tak-Pong Woo, Li-Hung Lin, K. Oto, Y. Ochiai, Chi-Te Liang, and N. Aoki, "Imaging coherent transport in chemical vapor deposition graphene wide constriction by scanning gate microscopy", Appl. Phys. Lett., 査読有, **108** (2016) 123105-1-5, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4944637>.  
② S. Kamimura, A. Date, M. Nakajima, G. Karczewski, T. Wojtowicz, J. Kossut, T. Tsuchiya, and H. Mino, "Turnover of Exciton Spin States in CdTe/Cd<sub>0.88</sub>Mn<sub>0.12</sub>Te Quantum Wells", J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **84** (2015) 104704-1-5, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.104704>.  
③ T. Kurihara, K. Nakamura, K. Yamaguchi, Y. Sekine, Y. Saito, M. Nakajima, K. Oto, H. Watanabe, and T. Suemoto, "Enhanced spin-precession dynamics in a spin-metamaterial coupled resonator observed in terahertz time-domain measurements", Phys. Rev. B, 査読有, **90** (2014) 144408-1-5, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.144408>.  
④ T. Kurihara, K. Nakamura, K. Yamaguchi, Y. Sekine, Y. Saito, M. Nakajima, K. Oto, H. Watanabe, and T. Suemoto, "Interactive magnetic coupling between spin precession and split-ring resonator in the terahertz frequency", Proc. Int. Conf. Infrared, Millimeter and Terahertz waves (IRMMW-THz) 査読有, **1** (2014) 1-2, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2014.6956186

[学会発表] (計35件)

- ① 色部潤, 有海祐伺, 石橋凌駕, 音賢一, 平山祥郎, 熊田倫雄, 「ブレークダウン電流による核スピン・ポンプと Kerr 効果を用いた局所的プロービング」日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年) 2016 年 3 月 22 日, 東北学院大学泉キャンパス (宮城県・仙台市)  
② 鎌形諒太, 音賢一, 「GaAs HEMT 構造の試料端近傍におけるカー回転を用いたスピン偏極測定」日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年) 2016 年 3 月 22 日, 東北学院大学泉キャンパス (宮城県・仙台市)  
③ 矢ヶ崎慶, 音賢一, 三野弘文, 尾松孝茂,

平山祥郎, 熊田倫雄, 「GaAs 量子ホール電子系の光渦照射による伝導度変化」日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年) 2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学泉キャンパス (宮城県・仙台市)

- ④ 栗原貴之, 渡邊浩, 軽部修太郎, 音賢一, 大谷義近, 中嶋誠, 末元徹 「ErFeO<sub>3</sub> の THz 誘起スピン再配列相転移初期過程におけるドメイン生成メカニズム」日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年) 2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学泉キャンパス (宮城県・仙台市)  
⑤ 小堀洋, 福岡大輔, 丸茂大樹, 小山星児, 深澤英人, 音賢一, 室清文, 「光励起による <sup>3</sup>He ガス高偏極核スピン状態の生成」日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年) 2016 年 3 月 19 日, 東北学院大学泉キャンパス (宮城県・仙台市)  
⑥ K. Oto, "Evaluation of fluctuations in two-dimensional electron system in quantum Hall regime by magneto-optical Kerr effect", Ajou-Chiba Univ. Symposium, 2015/12/11, Ajou University, Suwon (Korea)  
⑦ J. Irobe, Y. Ariumi, R. Ishibashi, and K. Oto, "Local probing of DNP induced by QHE breakdown current detected by magneto-optical Kerr effect", Ajou-Chiba Univ. Symposium, 2015/12/11, Ajou University, Suwon (Korea)  
⑧ 栗原貴之, 渡邊浩, 関根雄大, 斎藤友未, 中嶋誠, 音賢一, 末元徹 「ErFeO<sub>3</sub> における光誘起スピン再配列相転移ドメインの THz 近接磁場による制御」日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 18 日, 関西大学千里山キャンパス (大阪府・吹田市)  
⑨ 小堀洋, 丸茂大樹, 小山星児, 深澤英人, 音賢一, 室清文 「光励起による核スピン高偏極 <sup>3</sup>He ガスの直接生成法の開発」日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 16 日, 関西大学千里山キャンパス (大阪府・吹田市)

[その他]

ホームページ等 なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

音賢一 (OTO, Kenichi)  
千葉大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 30263198

##### (2) 研究分担者

中嶋誠 (NAKAJIMA, Makoto)  
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: 40361662

##### (3) 連携研究者

三野弘文 (MINO, Hirofumi)  
千葉大学・普遍教育センター・准教授  
研究者番号: 40323430