

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287071

研究課題名(和文)量子輸送チャネルを利用したTHz光源とTHz光子検出器の結合状態の基板上制御

研究課題名(英文)On-chip manipulation of the coupling between a THz light source and a photon detector using quantum transport channels

研究代表者

生嶋 健司 (Ikushima, Kenji)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20334302

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、THz電磁場を発生から伝送・検出まで完結して制御するオンチップ光学系を構築することである。その物理的舞臺として量子ホール端状態と量子ドット単一光子検出器が利用され、以下の成果が得られた。(1)単一光子レベルでTHz波を発光・伝送(共振)・検出する全電気駆動のオンチップ・光学系を実演した、(2)このオンチップ・THz光学系を用いた実験から、量子ホール端状態を注入電流とする発光がスピントリッブを介したランダウ準位間遷移であることが見出された。これらの成果は、THz光子のオンチップ制御の可能性を示すとともに、スピン自由度を加えた量子輸送チャネルによる新たな光子制御の展開を示唆する。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this work is to realize the on-chip THz system in which the generation, transmission and detection are electrically driven in a single chip. The platform is in a two-dimensional electron system in strong magnetic field. Using a point-source from quantum Hall edge states and a quantum-dot single photon detector, the following results are obtained. (1) Single photon detection of THz waves propagating a coplanar waveguide (or resonating in a coplanar split ring) is demonstrated. (2) Using these on-chip THz systems, it is found that photon emission due to electrons injected by edge channels requires the spin-flip Landau-level transition, probably through the spin-orbit interaction due to edge drift motion. These results provide the feasibility of on-chip THz photon manipulation and imply the possible applications of photon manipulation due to spin-polarized quantum transport channels.

研究分野：物性物理学

キーワード：メゾスコピック系・局在

### 1. 研究開始当初の背景

近年、デバイス上の狭い空間に閉じ込められた電子系を電磁場と強く結合させ、固体チップ上においても量子光学的なアプローチが可能になりつつある。特に、波長が長いマイクロ波領域では標準的な微細加工技術で共振器や伝送路の作製が可能であるため、主に超伝導をベースとしたデバイスで固体チップ上の Cavity QED の実演が報告されている(引用文献)。しかしながら、マイクロ波の光子エネルギーが小さいために単一光子検出が難しく、光の量子性を議論できない側面がある。一方、可視光領域では波長が短いために電磁場を固体内にうまく閉じ込めること自体がチャレンジングな課題となっている。光子エネルギーと波長とのトレードオフの関係を考慮すると、10meV 程度の光子エネルギーをもち、真空波長 100 ミクロン程度のテラヘルツ (THz) 帯域は、固体チップ上で電磁場の粒子と波動の両側面をうまく制御するという目的にとって絶妙なスペクトル領域であると考えられる。研究代表者らは、これまでの研究を踏まえて、強磁場中 2次元電子系(2DES)がその適切なプラットフォームの一つと考えた。なぜなら、(1)量子ホール端状態を注入電流とした THz 帯の単色点光源が作製できる(引用文献)、(2)単電子制御される強磁場中量子ドットは光の量子性を測定する上で不可欠な THz フォトンカウンタとして機能する(引用文献)からである。つまり、強磁場中 2DES では、サブ波長スケールの単色点光源とフォトンカウンタを一つの固体チップ上に組み込む条件が揃っている。これらの学術的背景を踏まえて、本研究では、端状態注入光源と量子ドットの結合状態を制御し、端状態からの発光メカニズムを明らかにすること、さらにはオンチップ光子制御への可能性を探ることを目指した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、強磁場中 2DES で実現される量子ホール端状態を注入電流とした点光源と単電子制御による量子ドット単一光子検出器を利用して、固体上の電磁場を発生から伝送・検出まで完結して制御するオンチップ光学系を構築することである。特に、広帯域な THz 伝送路や狭帯域な THz 共振器を用いて上記点光源と量子ドットの結合状態を制御し、エッジ注入光源の THz 発光メカニズムを明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究のデバイスは、GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ構造結晶から電子ビームリソグラフィにより作製された。ひとつは、量子ホール端状態を注入電流とした THz 点光源と量子ドット単一光子検出器を広帯域な伝送路で結合させたオンチップ光学系である(図1)。この系により、量子ホール端状態からの発光

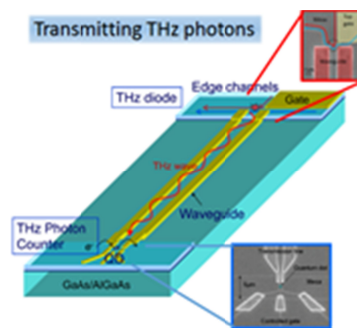


図1 伝送路により結合されたオンチップ THz 光学系(伝送タイプ)。

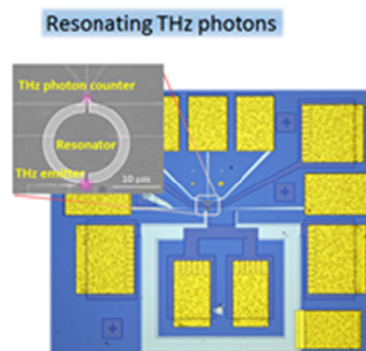


図2 スプリットリング共振器により結合されたオンチップ THz 光学系(共振タイプ)。

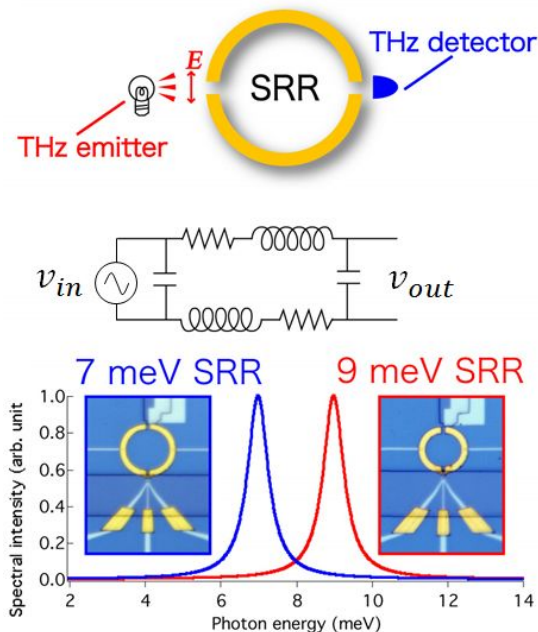


図3 スプリットリング共振器(SRR)。電磁場解析により共振エネルギー7meVと9meVの二つのタイプが設計・作製された。

に対して閾値電圧を正確に測定することが可能となる。もうひとつは、THz 点光源と量子ドット単一光子検出器をスプリットリング型共振器(SRR)により狭帯域に結合させたオンチップ光学系である(図2)。スプリットリングのサイズを変えることにより、異なる共振周波数(エネルギー:7meVと9meV)に設計することができる(図3)。発光部は、リング状の擬コルピノ型メサの一部にトッ

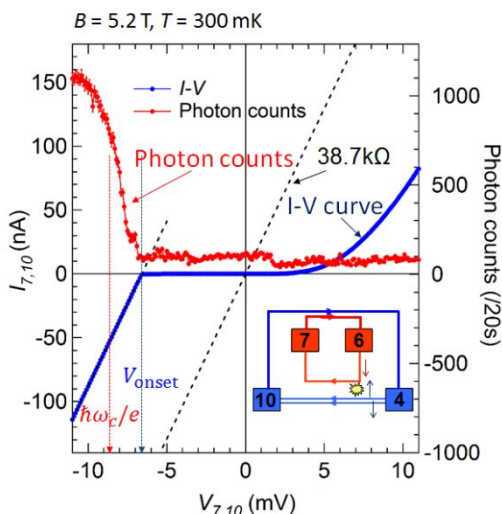


図4 伝送タイプにより測定された発光特性とIV特性。

プゲートを施し、外側のコンタクトから注入される最低ランダウ準位の端状態（ランダウ占有率  $\nu=2$ ）とリング内側のコンタクトから注入される上位ランダウ準位の端状態（ $\nu=3$ ）が合流し、非平衡分布が形成されるように設計されている。すべての測定は、0.3 K で行われた。

#### 4. 研究成果

伝送タイプのデバイスで測定した結果を図4に示す。内側と外側のコンタクトにソース・ドレイン電圧  $V_{SD}$  を印加すると、異なる電気化学ポテンシャルをもつ非平衡な端状態が合流し、電荷トランスファーに伴い THz 発光（ランダウ準位発光）が生じることが期待される。予想どおり、外側の端状態の電気化学ポテンシャルが低い条件（ $V_{SD} < 0$ ）において、明確な閾値電圧  $V_{onset}$  をもつ THz 発光が観測された。電圧・電流特性（IV特性）において、同じ閾値電圧で端状態間での電子トランスファーの促進が観測されている。ただし、 $eV_{onset}$  がサイクロトロンエネルギーよりも約2割ずれていることが見出された。

ここで重要な問題意識は、発光の光子エネルギーがサイクロトロンエネルギーに相当しているのか、それとも発光閾値電圧  $eV_{onset}$  に相当しているか？である。前者の場合、通常のランダウ準位発光と考えられるが、何故閾値電圧がずれるのか？、発光に必要なエネルギーの差分はどこから得られるのか？が疑問となる。一方、後者の場合、閾値電圧がサイクロトロンエネルギーより小さい理由は、スピン分裂の交換増強によるものと考えられる。しかしながら、その場合、スピンフリップを伴う発光（スピンフリップ・サイクロトロン発光）が生じていることを意味するため、通常のサイクロトロン共鳴におけるスピン選択則が破れることになる。

そこで我々は、実験的に光子エネルギーを決定することにした。図3で示した二つのSRRを用いて、フォトンカウンティング分光

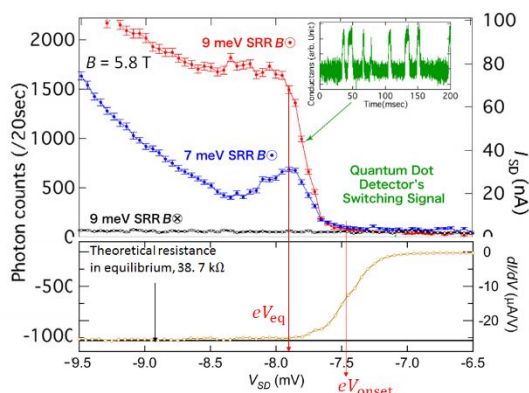


図5 共振タイプにより測定された発光特性とIV特性。

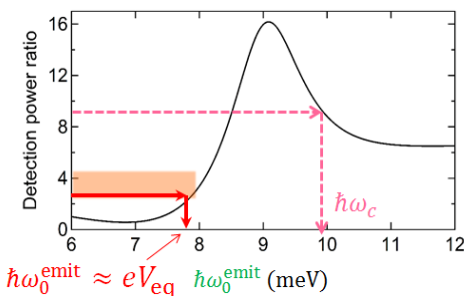


図6 共振器と量子ドット光子検出器のスペクトルを考慮し、発光の光子エネルギーの関数として表した二つの共振系の検出パワー比。

を行った。その手順は以下のものである。まず、SRRの共振エネルギーをサイクロトロンエネルギーに合わせた9meV-SRRと閾値電圧  $eV_{onset}$  に合わせた7meV-SRRの二つのデバイスを作製し、発光特性とIV特性を測定する。次に、共振器と検出器のスペクトルを既知と考え、発光スペクトルの中心周波数を推定する。

図5に示すように、伝送タイプと同様、サイクロトロンエネルギーよりも2割小さい閾値電圧をもつ発光が観測された。また、発光閾値近傍においてピークもしくはショルダーを示す特異な振る舞いが観測されている。IV特性をより詳細に調べると、そのピーク値近傍において二つの端状態が完全に平衡化することがわかる（電圧値  $eV_{eq}$ ）。

量子ドット光子検出器のスペクトルは先行研究の実験結果を用い、共振器のスペクトルは電磁場解析の結果を用いると、二つの共振器で検出されるパワー比は発光スペクトルの中心周波数  $\hbar\omega_0^{emit}$  の関数としてプロットすることができる（図6）。実験値の検出パワー比2から4程度から、発光の光子エネルギーはサイクロトロンエネルギー  $\hbar\omega_c$  とは異なり、 $eV_{eq}$  程度であることを示す。したがって、我々は極端に非平衡な端状態間で生成される光子のエネルギーは  $eV_{eq} \sim eV_{onset} < \hbar\omega_c$  であると結論付けた。これは、スピンフリップを伴う光学遷移過程が存在することを強く示唆する。これまでスピンフリップ・サイクロトロン共鳴はスピン-軌道相互作用の強いInSbやInAs系でのみ観測されており、

GaAs 系における報告は無かった。本研究では端状態間の散乱を利用しているため、通常のバルク GaAs 系とは異なる要因があると推測される。スピン偏極した端状態間散乱に対して議論されてきたエッジドリフト運動によって誘起されるスピン - 軌道相互作用がその要因の候補として考えられるだろう。さらに、上記デバイスを用いて、我々は様々なランダウ占有率に対する端状態間の非平衡緩和過程も明らかにしてきた。特に、 $\nu=3$  と  $\nu=1$  端状態間では閾値電圧は 2 倍、 $\nu=5$  と  $\nu=3$  の端状態間では閾値電圧は  $4/3$  倍になることが実験的に得られており、上記のスピン分裂の交換増強とスピンフリップを伴う緩和過程を考慮することにより説明が可能である。

一方、スピン - 軌道相互作用の強い InGaAs 系 2DES についても量子ホール端状態の非平衡生成について調べた。まず、GaAs 系 2DES では一般に見られる量子ホール遷移領域におけるエッジとバルクの非平衡現象が IV 特性において観測されなかった。さらに、同一温度、同一磁場、同程度の移動度に対して、GaAs 系 2DES と比べて、InGaAs 系 2DES では奇数の量子ホール効果が観測されにくいことが見出された。特に、ランダウ占有率  $\nu=7$  に対して、ラシエバ・パラメータ  $\alpha$  の増大とともに量子ホール効果が消失していくことが確認された。これらの結果は、強いスピン - 軌道相互作用により、エッジ間およびエッジ・バルク間においてスピンフリップ散乱が頻繁に生じるためと考えられる。したがって、InGaAs 系 2DES ではスピンフリップ・サイクロトロン発光が促進されることが予想される。

研究成果をまとめると、(1) 光子レベルでテラヘルツ波を発光・伝送(共振)・検出する全電気駆動のオンチップ・THz 光学系を実証した、(2) このオンチップ・THz 光学系を用いて、エネルギー無散逸な量子ホール端状態を注入電流とする発光過程が明らかにされた。(1) については、SRR により比較的バンド幅の狭い共振器が作成可能であり、複数の SRR を直列させることによりさらなる狭帯域化も可能であろう。(2) については、スピンフリップ・サイクロトロン発光を示唆する重要な結果が得られ、端状態のドリフト運動により誘起されるスピン - 軌道相互作用の寄与が重要と思われる。実際、強いスピン - 軌道相互作用をもつ InGaAs 系では、奇数フィリングの量子ホール効果やエッジ・バルク非平衡の損失が観測されており、スピンフリップ散乱の促進が示唆される。これらの知見から、端状態のドリフト速度の方向と結晶軸の関係により光学遷移確率が変わることが推測され、端状態の合流角度により発光が制御できる可能性がある。また、スピンフリップによる光学遷移確率の抑制は極端な非平衡分布を実現可能とするため、スピン共鳴などの補助的摂動による superradiance (引用文献) の制御という可

能性もある。本研究成果による知見と技術の向上は、量子ホール電子系を利用したスピン・光子制御の実現に向けた重要な基盤となるだろう。

#### <引用文献>

- O. Astafiev *et al.*, *Science* **327**, 840 (2010).  
K. Ikushima *et al.*, *PRB* **84**, 155313 (2011).  
S. Komiyama *et al.*, *Nature* **403**, 405 (2000).  
Q. Zhang *et al.*, *PRL* **113**, 047601 (2014).

#### 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 15 件)

H. Gamou, J. Ryu, M. Kohda, and J. Nitta  
“Different spin relaxation mechanisms between epitaxial and polycrystalline Ta thin films”  
*Applied Physics Express*, 査読有, Vol.10, 2017, 023003(1-4)  
DOI: 10.7567/APEX.10.023003

J-C. Ryu, M. Kohda, and J. Nitta  
“Observation of the D’yakonov-Perel’ Spin Relaxation in Single-Crystalline Pt Thin Films”  
*Physical Review Letters*, 査読有, Vol 116, 2016, 256802(1-6),  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.256802

Y. Kunihashi, H. Sanada, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, and T. Sogawa.  
“Drift transport of helical spin coherence with tailored spin-orbit interactions”  
*Nature Communications*, 査読有, Vol. 7, 2016, 10722(1-8)  
DOI: 10.1038/ncomms10722

M. Kohda, P. Altmann, D. Schuh, S. D. Ganichev, W. Wegscheider, and G. Salis.  
“All-optical evaluation of spin-orbit interaction based on diffusive spin motion in a two dimensional electron gas”  
*Applied Physics Letters*, 査読有, Vol. 107, 2015, 172402(1-4)  
DOI: 10.1063/1.4934671

A. Sasaki, S. Nonaka, Y. Kunihashi, M. Kohda, T. Bauernfeind, T. Dollinger, K. Richter, and J. Nitta  
“Direct determination of spin-orbit interaction coefficients and realization of the persistent spin helix symmetry”  
*Nature Nanotechnology*, 査読有, Vol. 13, 2014, 703-709  
DOI: 10.1038/NNANO.2014.128

K. Ikushima, A. Ito, and S. Okano  
“Generation, transmission, and detection of terahertz photons on an electrically driven single

chip”  
*Applied Physics Letters*, 査読有,  
Vol. 104, 2014, 052112(1-4)  
DOI: 10.1063/1.4864168

〔学会発表〕(計 34 件)

好田 誠、新田 淳作

「固体中におけるスピン軌道相互作用の新展開」

第 10 回物性科学領域横断研究会、2016 年 12 月 9-10 日、神戸大学 (兵庫県神戸市)

K. Ikushima

“Single Photon Detection of Terahertz Waves and its Applications”

41<sup>st</sup> International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), Sep. 29, 2016, Copenhagen, Denmark

S. Okano, T. Kobayashi, and K. Ikushima

“Single photon detection of terahertz waves on an integrated-circuit resonator”

Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2016), Aug. 10, 2016, Shanghai, China

M. Kohda, K. Yoshizumi, S. Takasuna and J. Nitta

"Spin orbit interaction in III-V semiconductor 2DEG and layered semiconductor GaSe"  
Frontiers in Quantum Materials and Devices Workshop (FQMD2016)  
Jun. 13-14, 2016, Wako Riken, Japan.

K. Ikushima, S. Okano, A. Ito

“Landau-Level Emission and Detection in Two-Dimensional Electron Systems”  
EMN (Energy Materials Nanotechnology) meeting on Terahertz, May 17, 2016, San Sebastian, Spain

K. Ikushima, S. Okano, A. Ito, and T.

Kobayashi  
“Converting Electrons to Photons in Highly Imbalanced Spin-Polarized Edge States --- On-Chip Terahertz Photon Counting Studies ---“  
EP2DS-21, Jul. 28, 2015, Sendai International Center (Sendai-shi, Miyagi)

M. Kohda

"Electrical spin generation and manipulation in semiconductor heterostructures"  
2015 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems and 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Jul. 26-31, 2015, Sendai International Center (Sendai-shi, Miyagi)

K. Ikushima

“Terahertz Photon-Counting Measurements for Landau-Level Physics in Two Dimensional Electron Systems”  
TeraNano VI, Jul. 2, 2015, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (Kunigami-gun, Okinawa)

S. Okano, A. Ito and K. Ikushima

“Energy Resolved Photon-Counting Measurements Using Quantum Dot Detectors Coupled to Split-Ring Resonator”  
TeraNano V, Dec. 5, 2014, Martinique, France

K. Ikushima

“Manipulating Terahertz Photons on a Solid State Chip Surface”  
TeraNano V, Dec. 1, 2014, Martinique, France

M. Kohda

“Spin orbit interaction in semiconductor heterostructures”  
SPIE Nanophotonics 2014, Aug.17-21, 2014, San Diego, USA

M. Kohda

“Stern-Gerlach type spin separation in semiconductor nanostructures”  
The 41<sup>st</sup> International Symposium on Compound Semiconductor (ISCS2014), May 11-15, 2014, Montpellier, France

岡野 俊、生嶋 健司、伊藤 惇、小林 貴司  
「量子ドット-エッジ状態結合系 THz 共振器と光子計数測定 I」  
日本物理学会、2014 年 3 月 28 日、東海大学 (神奈川県平塚市)

岡野 俊、生嶋 健司、伊藤 惇、小林 貴司  
「量子ドット-エッジ状態結合系 THz 共振器と光子計数測定 II」  
日本物理学会、2014 年 3 月 28 日、東海大学 (神奈川県平塚市)

K. Ikushima, A. Ito, S. Okano, and S.

Komiyama  
“On-chip terahertz photon transmission using quantum electron transport”  
ISANN ( International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology), Dec. 10, 2013, Hawaii, USA

岡野 俊、伊藤 惇、生嶋 健司

「量子ドット-エッジ状態結合系 THz 共振器」  
日本物理学会、2013 年 9 月 26 日、徳島大学 (徳島県徳島市)

S. Okano, A. Ito, and K. Ikushima

“Electromagnetic Modeling of Planar Terahertz Resonators for On-chip Photon Detection”

OTST2013 (International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013), Apr. 2, 2013, Kyoto-terrsa (Kyoto, Japan)

〔図書〕(計1件)

K. Ikushima (他16名)

*Springer*, “Frontiers in Optical Methods, Springer Series in Optical Sciences Vol. 180”

2014, 228(pp197-212)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

〔その他〕

プレスリリース

「世界初！半導体チップ上でテラヘルツ波の粒を発生・伝送・検出に成功」2014/2/10.

(日刊工業新聞 2014/2/21、日経産業新聞 2014/3/19)

研究室ホームページ

[http://web.tuat.ac.jp/~ikushima/index\\_j.html](http://web.tuat.ac.jp/~ikushima/index_j.html)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

生嶋 健司 (IKUSHIMA, Kenji)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20334302

### (2)研究分担者

好田 誠 (KOHDA, Makoto)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00420000

### (3)連携研究者

なし

### (4)研究協力者

小林 貴司 (KOBAYASHI Takashi)

ヴィデリエール ハドレイ (VIDELIER Hadley)

伊藤 惇 (ITO Atsushi)

岡野 俊 (OKANO Shun)