

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654085

研究課題名(和文) オンチップ・テラヘルツ検出による量子ホール系の単一光子検出と光子数揺らぎの研究

研究課題名(英文) Studies of photon creation and fluctuation emitted from quantum Hall electron systems via on-chip terahertz detection

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) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、量子ホール端状態を注入電流とした点光源と量子ドット単一光子検出器を利用して、オンチップ・テラヘルツ光学系を構築し、端状態を注入電流としたサイクロトロン発光を調べることである。本研究により、(1)端状態における発光の閾値電圧がIV特性における閾値電圧と一致する、(2)スピン偏極した端状態においてスピン分裂はバルクGaAsよりも20倍以上に増大する、ことが見出された。これらの結果は、スピンフリップを伴うサイクロトロン発光の可能性を強く示唆する。このことは、コヒーレントなスピン偏極電流によりスピン情報を光子へ転写できる可能性を示唆しており、量子情報デバイスとしての発展が期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this work is to investigate mechanism of cyclotron emission due to electrons injected by quantum Hall edge states through integrated terahertz photon circuits in which quantum-dot single terahertz photon detectors are embedded. In this work, we found (1) THz photons are emitted from edge states with a clear onset voltage, where the electrochemical potential of the outer  $\nu=2$  edge states is lower than that of the inner  $\nu=3$  edge states (where  $\nu$  is Landau level filling factor) and (2) the spin splitting is enhanced by a factor of about 20, comparing with that in bulk GaAs, because of the exchange interaction in the spin polarized edge states. These results strongly suggest the presence of spin-flip cyclotron emission requiring spin-orbit interaction. This indicates the possibility of transfer from spin states to photon states through coherent spin-polarized edge states, providing a new approach to quantum information devices.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 物性I

キーワード：量子ホール効果 量子ドット テラヘルツ

1. 研究開始当初の背景

電子は電荷 $-e$ と質量 $m$ をもつ素粒子であるから、周辺の静電ポテンシャル変化により電子の運動はたやすく制御される。近年では半導体ナノ構造によって固体における電子を1個レベルで制御する単電子デバイスが実現されている。一方で、光子は質量ゼロの相対論的素粒子である上に周辺との結合が弱いので、固体デバイスにおいて電磁場を単一光子レベルで高度に制御することは極めて困難である。しかしながら、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。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光子制御するという観点で適当なスペクトル領域であると考えられる。我々は、これまでの研究を踏まえて、特に強磁場中2次元電子系がその良いプラットフォームであると考えている。なぜなら、強磁場中2次元電子系では(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、(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、からである。つまり、強磁場中2次元電子系では、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、本研究では特にオンチップ光子検出により端状態注入光源の特性を明らかにする。

2. 研究の目的

本研究の目的は、強磁場中2次元電子系で実現される電流揺らぎの抑制された量子ホール端状態を用い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・テラヘルツ光学系を構築することである。特に本研究では点光源の開発に焦点を合わせ、ノイズレス端状態を注入電流としたランダウレベル発光のメカニズムをスピン自由度を含めて総合的に解明する。本研究により、固体チップ上の Hanbury Brown and Twiss (HBT) 実験や量子ドット - 電磁場の強結合制御への道が

開かれ、DC駆動する光子回路という新しい展開が期待される。

3. 研究の方法

(1) オンチップ・THz 発生/伝送/検出デバイスを作製し、量子ホール端状態の極端な非平衡分布における電子スピン散乱およびそれに伴うランダウ準位間光学遷移過程を調べる。磁場中における試料回転実験においてスピン分裂の大きさを制御し、交換増強された $g$ 因子の大きさとスピン・フリップ過程が光学遷移に与える効果を明らかにする。

(2) 発光部(端状態合流点)と検出部(量子ドット)を共振器で結合させた素子を作製し、量子ホール端状態の発光特性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) オンチップ・テラヘルツ光子伝送に関するデバイス設計・作製

本デバイスは GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ構造(電子濃度 $3 \times 10^{15} \text{m}^{-2}$ , 移動度  $56 \text{m}^2/(\text{Vs})$ )において、電子ビームリソグラフィにより作製された(図1)。周波数2.1THzのテラヘルツ伝送のためのtwo-wire平面導波路は200nm厚のNiCr/Au層で作製された。導波路の全幅は $6 \mu\text{m}$ , wire間隔は $1.2 \mu\text{m}$ である。このときの導波路の特性インピーダンスはGaAsにおける波長 $38 \mu\text{m}$ に対して $Z_0 = 76 \Omega$ である。量子ドットの THz 帯でのインピーダンス( $Z_{QD} \sim 30 \Omega$ )を用いると、伝送係数は $1 - (Z_0 - Z_{QD})^2 / (Z_0 + Z_{QD})^2 = 0.81$ と計算される。発光部のインピーダンスが量子ドットと同程度と仮定すると、伝送効率率は $(0.81)^2$ と

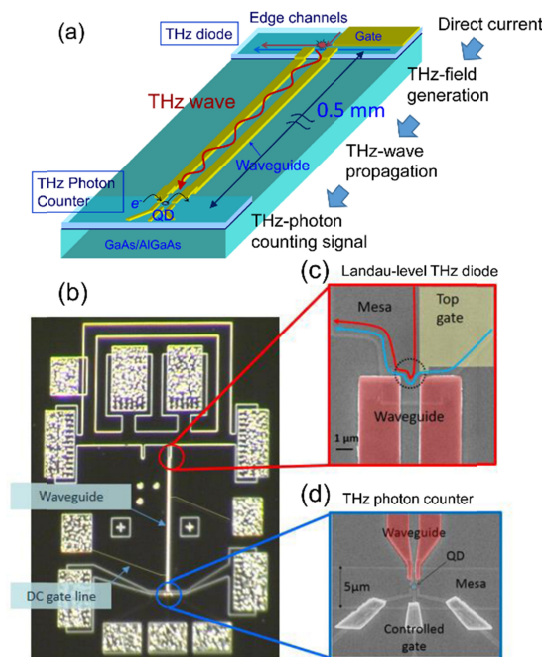


図1 (a) オンチップ・テラヘルツ光子伝送のための集積回路概念図。(b) デバイスの光学顕微鏡写真。(c) and (d) 発光部と検出部の電子顕微鏡写真

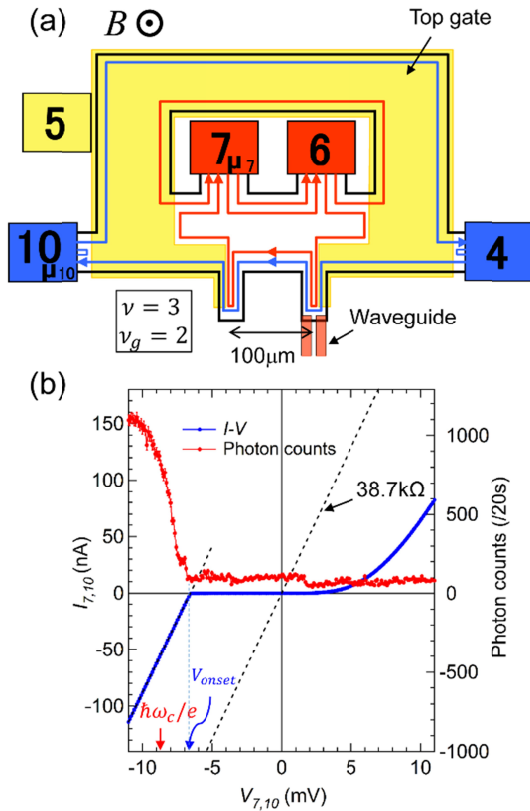


図2 ランダウレベル THz ダイオード (発光素子) (a) 概念図。 (b) トランスポート特性と発光特性。

見積もられる。さらに、放射損失は文献値から 1.15 dB/L であり、長さ  $L = 0.5$  mm に対して 23 % の損失であることが見積もられる。よって、インピーダンス整合を考慮して、本デバイスで作製された THz 導波路の伝送効率マイクロ波技術をベースとして約 50 % に達する。

### (2) 実験結果・解析

図 2 (a) に発光素子の概念図を示す。部分的にトップゲートを施したリング状メサ構造はエネルギー散逸部分をエッジ状態合流部分に制約する。その結果、トランスポート特性と発光特性の明確な比較が可能となる。図 2 (b) にそのトランスポート特性と発光特性の結果を示す。ランダウ準位によりダイオード的な非線形 IV 特性が観測されている。内側 (7 番) と外側 (10 番) のコンタクトを流れる有限の電流は、隣接したエッジ状態間の電子トランスファーの存在を示す。以下、ランダウ占有率  $\nu = 3$ 、トップゲート下の占有率  $\nu_g = 2$  とした場合について述べる。明確なオンセット電圧が負の  $V_{7,10}$  領域で観測された。この明確な閾値振る舞いは、エッジ状態間の電子トランスファーの促進を示唆する。一方、THz 光子は同じオンセット電圧値で発生していることがわかった。また、図 3 のように、

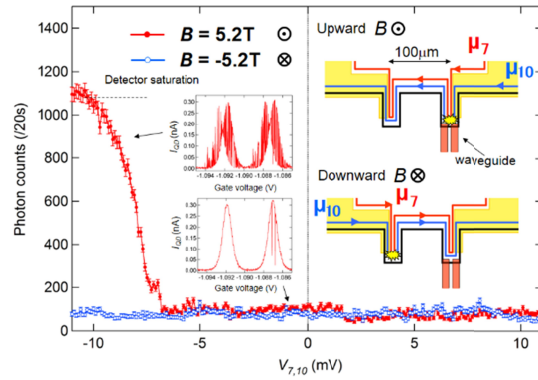


図3 平面導波路との近接場結合制御

合した場合と 100  $\mu\text{m}$  離れている場合の結果をそれぞれ示す。この結果から、金属平面導波路を伝播するテラヘルツ信号をフォトンカウンティングしていることが確認された。

### (3) さらに実験結果と議論

量子ホール端状態におけるサイクロトロン発光は、端状態の電気化学ポテンシャルの差がサイクロトロンエネルギーに到達したときのエネルギープロファイルの再構築により定性的に説明される。しかしながら、図 2 に示すように、オンセット電圧値が明らかにサイクロトロンエネルギーからずれている。その原因は、交換相互作用により大きく増大したスピン分裂によるものと仮定し、様々なランダウ占有率の条件において IV 特性の詳細な実験を行った。さらに、磁場中で試料を回転し、オンセット電圧の角度依存性を測定した。これらの実験結果から、(1) バルク GaAs の約 20 倍程度増強されたスピン分裂が示唆される ( $g$  因子:  $g = -8$ ) (2) 高次のランダウ準位間でも増大された  $g$  因子はほぼ一定である、(3) 占有率を固定した印加磁場依存性においてスピン分裂はほぼ一定である、ことが見出された。これらの結果は、交換相互作用により増大したスピン分裂に関する量子ホール系の先行研究と矛盾しない。また、IV 特性と発光の閾値電圧が一致していることから、観測されたテラヘルツ発光はスピンフリップを伴うプロセスであることが予想される。そこで、光子エネルギーを分別するために、サイクロトロンエネルギーとオンセットエネルギーのそれぞれの周波数に調整された平面テラヘルツ共振器を用いて、端状態からの発光をオンチップ・分光 Y. Miyamoto, K. Kobayashi, A. Ito, and K. Ikushima することを開始した。放射ロスが小さいことから、二つの並列 LC 回路を等価回路とする split-ring タイプの共振器を採用した。有限要素法による電磁場解析により、バンド幅 7% の共振器を設計した。現時点の最新結果では、発光閾値近傍ではスピンフリップサイクロトロン発光が生じ、印加電圧がサイクロトロンエネルギーに近づくにつれて通常のサイクロトロン発光が優勢になることが示唆されている。ただし、スピンフリップ

プ・サイクロトロン発光が生じるには、端状態のドリフト速度に起因したスピン - 軌道相互作用が要請されると思われ、さらなる検証が必要である。

#### (4) 結論と今後の展望

DC 電圧駆動により、テラヘルツ発光 / 伝送 / 検出する光子回路のプロトタイプを作製した。このテラヘルツデバイスを用いて、量子ホール端状態を注入電流とする発光について調べた。その結果、(1) スピン偏極した端状態における大きなスピン分裂、および (2) スピンフリップ・サイクロトロン発光の可能性、が見出された。スピンフリップ・サイクロトロン発光の可能性についてさらなる検証を行うため、テラヘルツ共振器による端状態 - 量子ドット結合系により、オンチップ・分光した。その結果、オンセット電圧に相当するエネルギー (約 7meV) の光子が生じていること、つまり、スピンフリップ・サイクロトロン発光が生じていることが強く示唆された。これらの成果は、コヒーレントなスピン偏極電流によりスピン情報を光子へ変換できる可能性を示唆しており、量子情報デバイスとしての発展が期待される。

#### 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 2 件)

[1]Kenji Ikushima, Atsushi Ito, and Shun Okano

Generation, transmission, and detection of terahertz photons on an electrically driven single chip

Appl. Phys. Lett. 104, 052112, p.1-4, (2014)

査読 有

DOI: 10.1063/1.4864168

[2]Yosuke Miyamoto, Koki Kobayashi, Atsushi Ito, and Kenji Ikushima  
Passive Infrared Microscope with High Spatial Resolution

Proceedings of the 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) p.1-2, (2012) 査読 有

DOI:10.1109/IRMMW-THz.2012.6380460

[学会発表] (計 10 件)

[1]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。

[2]生嶋健司、岡野俊、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

日本物理学会、2014 年 3 月 28 日、東海大学。

[3]Kenji Ikushima, Atsushi Ito, Shun Okano, and Susumu Komiyama (Oral)  
On-chip terahertz photon transmission using quantum electron transport  
ISANN (International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology)  
Dec.10.2013(Hawaii, USA).

[4]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。

[5]Y. Miyamoto, Koki Kobayashi, Atsushi Ito, and Kenji Ikushima (Poster)  
Local detection of thermal radiation emitted from the liquid-solid interface  
OTST2013 (International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013) Apr. 4.2013(Kyoto, Japan).

[6]Shun Okano, Atsushi Ito, and Kenji Ikushima (Poster)  
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, Japan).

[7]伊藤惇、岡野俊、生嶋健司  
量子ホール端状態間散乱を用いた閉じ込めポテンシャル近傍のスピン分裂の研究  
日本物理学会、2013 年 3 月 28 日、広島大学。

[8]Kenji Ikushima, Yosuke Miyamoto, Koki Kobayashi, Atsushi Ito, and Shun Okano  
Quantum-dot applications to Terahertz Science (Invited)  
German-Japanese International Workshop "Structure and Control of Interfaces"  
Jan.9-11.2013 (Berlin, Germany).

[9]生嶋健司、伊藤惇、岡野俊  
量子ホール端状態のスピン偏極電子注入による光子生成  
日本物理学会、2012 年 9 月 18 日、横浜国立大学。

[10]Kenji Ikushima  
On-chip terahertz photon manipulation (Invited)  
ISCS2012 (39th International Symposium on Compound Semiconductors)  
Aug.27.2012(Santa Barbara, USA).

[図書] (計 1 件)

[1]Kenji IKUSHIMA(他 16 名)  
Springer  
Single-Photon Counting and Passive

Microscopy of Terahertz Radiation  
Frontiers in Optical Methods, Springer  
Series in Optical Sciences Vol.180,  
総ページ数 228(pp.197-212), 2014

〔その他〕

[1]ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~ikushima/>

[2]報道関連情報

『半導体素子 高速で演算』日経産業新聞  
平成 26 年 3 月 19 日（水）掲載。

『半導体チップで検出』日刊工業新聞  
平成 26 年 2 月 21 日（金）掲載。

## 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 なし

(3) 連携研究者 なし