

補助事業番号 2024M-374
補助事業名 2024年度 半導体量子ディスクによる単一高次光子・量子もつれ光源の
開発 補助事業
補助事業者名 千葉大学 大学院工学研究院 量子光情報研究室 森田 健

1 研究の概要

本事業では、半導体量子ドットを用いた高効率「単一光子・量子もつれ光源」の既存技術を発展させた【半導体量子ディスクによる単一高次光子・量子もつれ光源の開発】に取り組む。量子ドットからは「スピン」のみを保持する「単一光子」を発生することが知られている。電子の自由度が方位角方向に存在する半導体量子ディスクからは、「スピン」だけでなく「軌道」も同時に保持した「単一高次光子」の生成、さらにはそれらのもつれ状態の生成が期待できる。

2 研究の目的と背景

(背景) 現在の光ファイバーを用いたインターネット通信は、大容量化の進展により耐久密度の限界に近づいている。また、古典的な公開鍵暗号技術は、計算機性能や暗号解読技術の進歩により安全性の維持が困難になりつつある。これらの課題に対する根本的な解決策として、光子を情報担体とする量子情報通信が注目されている。特に、「単一光子」同士の相関によって形成される「量子もつれ状態」は、量子情報通信の中核をなす技術である。

(目的) 本事業では、GaAs/AlGaAs 量子井戸を半径約 100 nm の円盤状に加工した単一量子ディスクを作製し、そこから得られる励起子および励起子分子の発光遷移を利用して、「スピン」と「軌道」の自由度をもつ高次光子ともつれ光子対の生成と評価を行う。これらの発光遷移を分光的に分離し、単一光子の強度相関測定および二光子間の相関測定を通じて、単一高次電子スピンの特性とハイブリッド量子もつれの実現性を実証することを目的とする。

3 研究内容 <https://sites.google.com/faculty.gs.chiba-u.jp/morita-kakue-lab/>

(1) 半導体量子ディスク構造の作製

多積層構造を有するGaAs量子ディスクの作製に成功した。本試料の作製にあたっては、共同研究者である産業技術総合研究所ハイブリッド機能集積研究部門の揖場聡氏によるエッチング条件の最適化および高精度な微細加工プロセスのご支援により、量子ディスクお



図1: (a) GaAs/AlGaAs量子井戸を微細加工し、量子ディスク構造を作製した。(b)エッチング条件を最適化した後に作製したGaAs量子ディスク・リング構造。

よびリング構造の形成が可能となった。図1には、GaAsバルク基板の上に形成されたディスクおよびリング構造の加工後の画像を示す。

(2) 量子ディスク構造からの発光測定技術の確立の確立

① SPDCによる量子もつれ光子対生成

光子のもつれ対生成および検出系の構築を完了し、検出実験を開始した。図2には、BBO結晶内での自発的パラメトリック下方変換（SPDC）によって生成された光子対が、2つの経路に分岐し、それぞれ高感度アバランシェフォトダイオードによって検出される様子を示す。測定結果は、SPDCによる光子対の生成が適切に行われていることを示している。

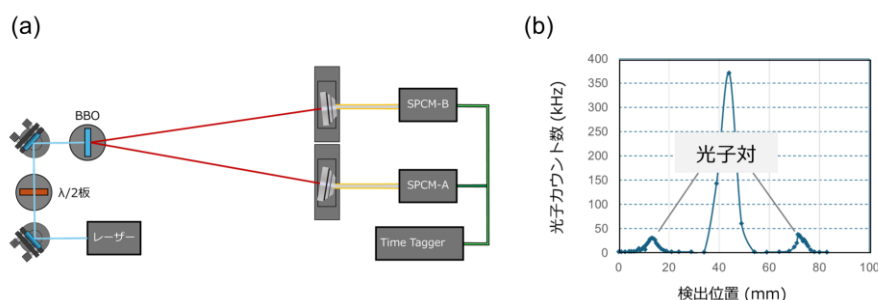


図2：(a) BBO結晶によるSPDC（自発的パラメトリックダウンコンバージョン）で生成される光子対を検出するための光学系の構成。(b) 検出器の位置を走査することで、光子対の生成位置に対応した領域で光子が検出されている様子を示している。

② 高次光子の生成と評価技術・量子ディスク構造からの発光測定技術の確立

Q-plateと波長板を組み合わせることで、任意の高次軌道角運動量（OAM）状態を有する光子の生成に成功した。生成された高次光子に対しては、ストークスベクトルの空間的分布を評価するとともに、空間光変調器（SLM）とシングルモードファイバーを組み合わせた測定系を構築し、軌道角運動量およびスピン角運動量（偏光）の特性評価を可能とする技術を確認した。図3(a)に高次光子を生成するための光学系を示し、図3(b)に特定のSAM状態に対応するOAM成分の測定結果を示す。

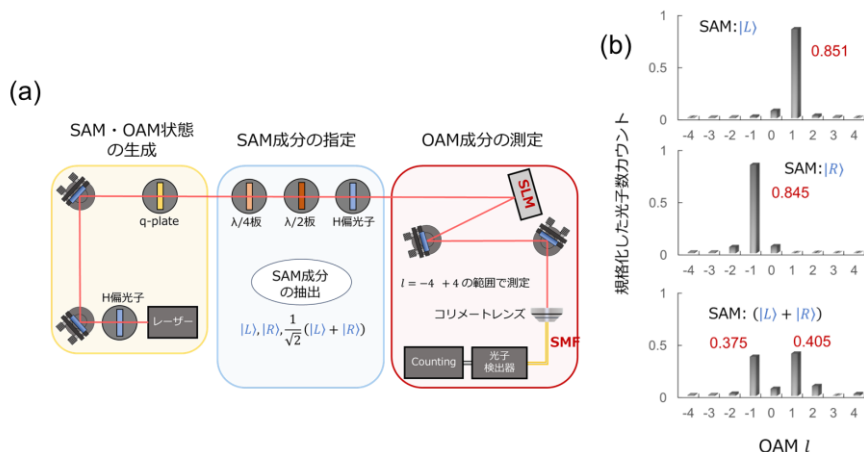


図3：(a)スピン角運動量（SAM）および軌道角運動量（OAM）の両方を持つ光子を生成し、それぞれの成分を評価するための光学系。(b)特定のSAM状態に対応するOAM成分の測定結果を示す。

③ 量子ディスク構造を評価する顕微光学分光システムの構築

量子ディスク構造を評価するため、顕微光学分光システムを新たに構築し、多積層量子ディスク構造からの発光スペクトルの取得に成功した。本成果は、詳細なデータは未発表のため本報告書では非公開とする。図4(a)に構築した光学系の概略図を、図4(b)にその実際の画像を示す。本システムにより、微細領域に形成された個々の量子ディスクからの光学的特性を、高い空間分解能で評価することが可能となった。

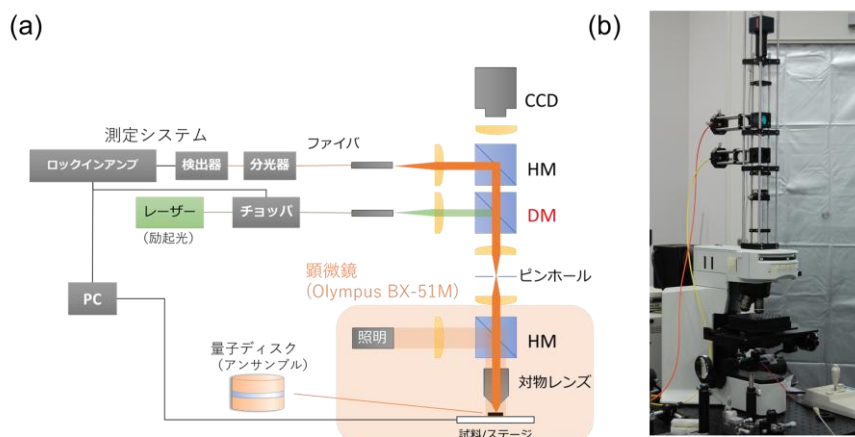


図4：(a) 構築した顕微光学分光システムの概略図。(b) 実際に構築されたシステムの外観画像。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

通常の単一光子は2次元量子空間で構成される「スピン」しか持たない。一方、「単一高次光子」は「スピン」だけでなく多次元の量子空間で構成される「軌道」も持ち、新しい自由度が加わった高密度な量子ビット情報を符号化できる特殊な「単一光子」と見なすことができる。したがって、単一高次光子同士をもつれさせた「単一高次光子・量子もつれ光源」の開発事業は、高次元量子空間を飛び交う未来の量子通信技術（量子暗号技術・量子テレポーテーション・量子演算技術）で用いられる光源開発事業である。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

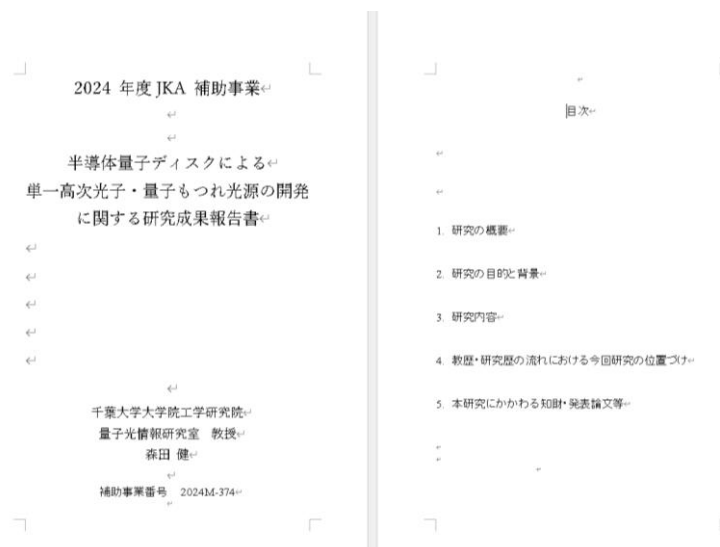
これまで、半導体中のスピン軌道相互作用に関する微視的な物理現象を主な対象として研究を行ってきた。しかし、次第に物性の詳細な理解にとどまらず、量子の新たな自由度を活用した情報技術への応用、すなわち未来志向の量子技術への関心が高まった。今回の研究は、そうした問題意識のもと、これまでの知見を土台にしつつ、量子光源の新たな設計と実装という応用的かつ挑戦的な領域へと踏み出したものである。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

1. Kaito Terashima, Ryota Ito, Takashi Kakue, Nobuhiko Yokoshi, and Ken Morita, "Optical initialization and manipulation of higher-order electron states with spin and orbital angular momentum in a semiconductor quantum disk," *Optics Express* **33**(3), 4700–4713 (2025).
2. Toshiki Matsumoto, Sota Sato, Shota Akei, Yuichiro Nakano, Satoshi Iba, Jun Ishihara, Katsuhiko Miyamoto, Nobuhiko Yokoshi, Takashige Omatsu, and Ken Morita, "Coherent transfer of the higher-order polarization state of photons to the spin structure state of electrons in a semiconductor," *Optica Quantum* **2**(4), 245–253 (2024).
- 3.

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの



(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

該当無し

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 千葉大学大学院工学研究院

住 所： 〒263-8522

千葉市稲毛区弥生町1-33

担 当 者： 教授 森田 健 （モリタ ケン）

担 当 部 署： 千葉大学西千葉地区事務部 佐野 千賀 （サノ チカ）

E - m a i l： morita@chiba-u.jp

U R L：<https://sites.google.com/faculty.gs.chiba-u.jp/morita-kakue-lab/>