

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02203

研究課題名（和文）高対称ナノ構造による高忠実な非古典的光子発生

研究課題名（英文）High-fidelity generation of non-classical photons with highly-symmetric nanostructures

研究代表者

迫田 和彰（SAKODA, Kazuaki）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・特命研究員

研究者番号：90250513

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,400,000円

研究成果の概要（和文）：液滴エピタキシー法による高対称量子ドットの励起子発光を利用した、高効率・高忠実な非古典光の発生と、新しい材料系の開発による波長領域の拡大を主な目標として研究を実施し、以下の研究成果を得た。電流励起型非古典光子源の実現、液滴エピタキシー法による通信波長帯の非古典光子源の開発、励起子アハラノフ・ボーム効果の解析と観測用試料の作製、パーセル効果による等電子トラップからの単一光子の発光促進、Cdカルコゲナイドナノプレートの合成と励起子発光の解析、トポロジカルフォトリック結晶によるカイラル導波路の解析と設計、磁気光学測定による、高対称GaAs量子ドットの超微細相互作用の大きさの決定。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の光励起による量子もつれ合い光子対発生に加えて、p-i-n接合による電流励起型素子が実現できたこと、および、通信波長帯の高対称量子ドットが開発できたことから、量子暗号通信への応用が期待できる。また、液滴エピタキシーによる高対称量子ドットの作製と両立する、トポロジカルフォトリック結晶のエッジ状態を利用した一方通行円偏光導波路を用いることで、マイクロ光回路による光子対の空間分離が可能となり、量子もつれ合い光子源の飛躍的な小型化も期待できる。

研究成果の概要（英文）：Mainly aiming at the generation of efficient and high-fidelity nonclassical light using exciton emission from highly symmetric quantum dots by the droplet epitaxy method and the expansion of the wavelength region by the development of new materials, the following research achievements were obtained. (1) Realization of current-injection nonclassical photon source, (2) Development of nonclassical photon source in communication wavelengths by the droplet epitaxy method, (3) Analysis of exciton Aharonov-Bohm effect and fabrication of relevant specimens, (4) Acceleration of single photon emission from isoelectronic traps by Purcell effect, (5) Synthesis of Cd chalcogenide nanoplates and analysis of exciton emission, (6) Analysis and design of chiral waveguides in topological photonic crystals, (7) Determination of hyperfine coupling constants of highly symmetric GaAs quantum dots by magneto-optic measurements.

研究分野：光物性物理学

キーワード：量子ドット 等電子トラップ フォトリック結晶 単一光子 もつれ合い光子対

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

盗聴が原理的に不可能な量子暗号通信が精力的に研究され、その実現に必要な単一光子源と量子もつれ合い光子源の開発が今日、光物性物理学の重要な研究分野となっている。特に、化合物半導体量子ドットの励起子準位を用いた単一光子源、および、励起子分子からのカスケード発光を利用した量子もつれ合い光子源は、パルス光励起によるオン・デマンド光子発生が可能であることから、量子暗号通信の非古典光源の有力候補として精力的に研究が進められている。しかし、従来から広く用いられている Stranski-Krastanov 法による歪み系量子ドットは、基板と量子ドットの格子定数の差に起因する内部応力により、電子・ホール間のクーロン力に匹敵するほどの大きなピエゾ電場がドット内に発生して、エネルギー準位をランダムに大きくシフトさせてしまう。また、ドット形状の異方性に伴う閉じ込めポテンシャルやピエゾ電場の異方性によって、本来は縮退して円偏光の発光を与える励起子準位が、直線偏光の発光を与える2つの準位に分裂する。このような励起子準位のシフトや分裂は、もつれ合いの忠実度を減少させるという問題を引き起こす。

これに対して、申請者らが開発した液滴エピタキシー法による格子整合系量子ドットは、基板と量子ドットの格子定数が等しいので、内部応力によるピエゾ電場が生じないという極めてすぐれた特徴をもつ。また、構造歪みを伴わないことから、高い空間対称性をもつ量子ドットの作製が可能である。特に、従来から使用してきた AlGaAs(100) 基板面に代えて、より対称性の高い(111)A面を用いることで、生成する量子ドットの円対称性を向上させることに成功した。この結果、構造異方性に伴う微細構造分裂幅も格段に減少し、ドットのサイズに依らず(したがって、ドットの発光エネルギーに依らず) 30 μ eV 以下という、世界最高レベルの小さな微細構造分裂幅を達成した (Mano et al., Appl. Phys. Express, 2010)。さらに、この量子ドットを用いて励起子分子状態からのカスケード発光によるもつれ合い光子対発生を光子相関の測定で検証し(図1)、世界最高のもつれ合いの忠実度 86% を達成した (Kuroda et al., Phys. Rev. B, 2013)。

これらの量子ドットによる非古典光の発生に加えて、GaAsやAlAs、GaP結晶中の窒素ペア等電子トラップ(図2)に捕捉された励起子からの単一光子発生では、試料構造の均一性を反映して、発光の不均一幅は50 μ eV以下のきわめて小さな値をとり得る。

2. 研究の目的

本研究は、液滴エピタキシーによる高対称 GaAs 量子ドットと δ ドープで作製する窒素ペア等電子トラップについて、高効率・高忠実な単一光子発生と量子もつれ合い光子対発生の実現を第1の目的とする。また、新しい材料系の開発による非古典光発生の波長領域の拡大を第2の目的とする。

3. 研究の方法

従来から行っている液滴エピタキシー法による高対称量子ドットの作製を基礎として、以下の手法等を用いて上記の目標の達成を目指した。(1)配置間相互作用の方法による閉じ込め励起子の電子状態の解析、(2)パーセル効果を利用した発光促進、(3)高対称基板面を利用した高対称量子ドットの作製、(4)精緻な光子相関測定による特性解明、(5)p-i-n構造の導入による電流励起単一光子・もつれ合い光子対発生。

4. 研究成果

【概要】当初計画に沿った、①電流励起型非古典光子源の実現、②液滴エピタキシー法による通信波長帯の非古典光子源の開発、③配置間相互作用の方法による、励起子アハラノフ・ボーム効果の解析と観測用試料の作製、④フォトニック結晶共振器を利用した、パーセル効果による等電子トラップからの単一光子の発光促進、等の成果に加えて、当初計画には無かった、⑤Cd カルコゲナイドナノプレートの合成と励起子発光の解析、⑥トポロジカルフォトニック結晶によるカイラル導波路の解析と設計、⑦磁気光学測定による、高対称 GaAs 量子ドットの超微細相互作用の大きさの決定、などの成果も得られた。以下では項目①～⑥についてさらに詳しく述べる。

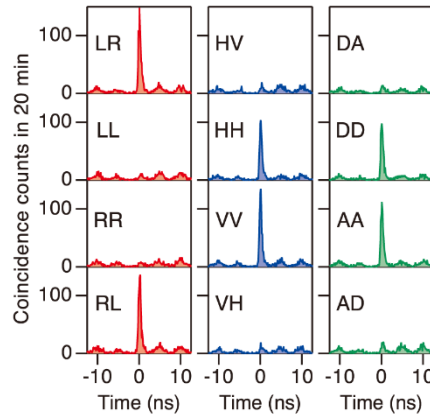


図1 (左)種々の偏光状態の2光子の相関, L(R):左(右)円偏光, H(V):横(縦)直線偏光, D(A):右(左)斜め直線偏光。(右)光子対の密度行列。

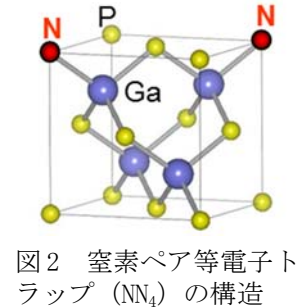
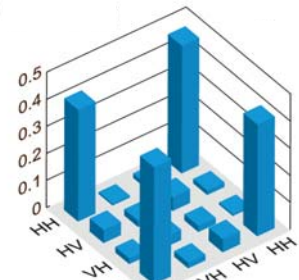


図2 窒素ペア等電子トラップ (NN₂) の構造

【研究成果の詳細】

(1) 電流励起型量子もつれ合い光子源の開発

GaAs (111)A 基板に、まず、Si をドープした n 型 AlGaAs 膜を作製し、次いで液滴エピタキシー法による GaAs 量子ドットと C をドープした p 型 AlGaAs 膜を作製することで、GaAs 量子ドットを内部に含む p-i-n 接合ダイオードを作製した。図 3 に電流-電圧 (I-V) 特性、励起子 (X) および励起子分子 (XX) の EL (エレクトロルミネッセンス) 発光スペクトル、および、発光強度の投入電流依存性を示す。10K の測定と比べて発光強度が 4 分の 1 程度まで減少するものの、70K においても明瞭な励起子、および、励起子分子の単一ドット発光が観測された。図 3(c) に見られるように、発光強度の勾配は励起子分子が励起子の 2 倍程度であり、理論通りの結果である。図 4 は励起子分子発光に関する 2 光子相関の測定結果である。図 4(a)~(c) に示すように、右円偏光 (R) と左円偏光 (L) の組合せについて、期待通りのアンチバンチング (LL) とバンチング (LR) が各温度において観測された。量子もつれの忠実度は温度とともに減少するものの、65K でも古典限界を超える明瞭な量子相関が観測された (図 4(d))。今後、GaAs/AlGaAs の組合せよりも大きなバンドオフセットの材料を組合せて、電荷の閉じ込めをいっそう強くすることで、さらに高温での量子もつれ合い光子対発生が期待できる。

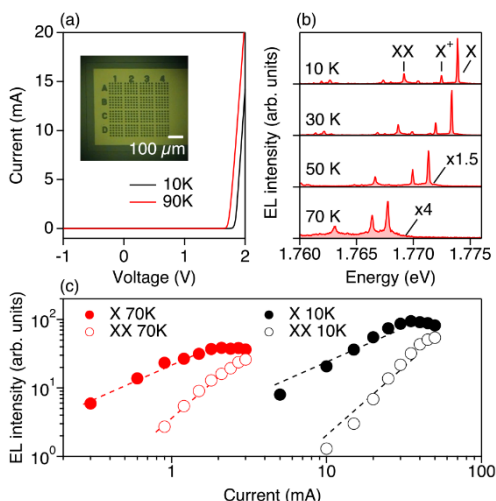


図 3 (a) I-V 特性。(b) 単一の GaAs 量子ドットの EL スペクトル。(c) 投入電流と励起子および励起子分子の発光強度の関係。

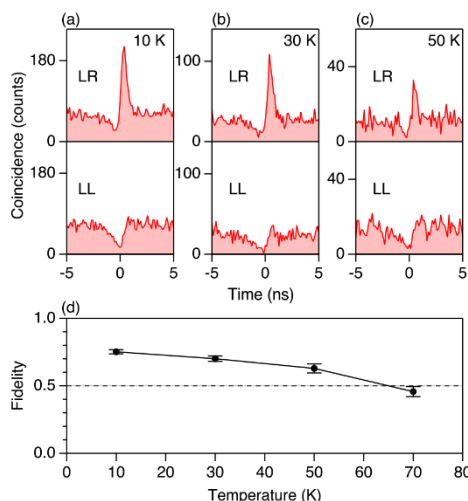


図 4 (a) 10 K, (b) 30 K, および, (c) 50 K における 2 光子相関。(d) 忠実度の温度変化。

出典 : N. Ha et al., Appl. Phys. Lett. **115**, 083106 (2019)

(2) 通信波長帯の非古典光子源の開発

3 回対称な InP (111) A 基板の液滴エピタキシーにより、高対称 InAs 量子ドットの作製に成功した。特に、InAlGaAs をバリア層に採用することで、通信波長帯 (1.55 μm) の単一光子源が得られた。図 5(a) は 12K におけるマクロ PL (フォトルミネッセンス) スペクトルであるが、慎重に量子ドットの成長を最適化することで、ドットサイズの分布を減らすことができたため、ドットの大部分は通信 C バンドで発光させることができた。また、図 5(b) は顕微分光法で測定した単一ドットの発光スペクトルであるが、励起子 (X)、励起子分子 (XX)、正に帯電した励起子 (X⁺) の鋭い発光が観測された。励起子発光について光子相関測定を行い、単一光子発生を確認した。励起子の発光寿命は 1.56ns で、無輻射遷移の影響をほとんど受けていないことも分かった。高対称 GaAs 量子ドットの場合と同様、高忠実なもつれ合い光子対発生が期待でき、また、バリア層の工夫によって励起子の閉じ込めを強くすることで、高温動作が期待できる。

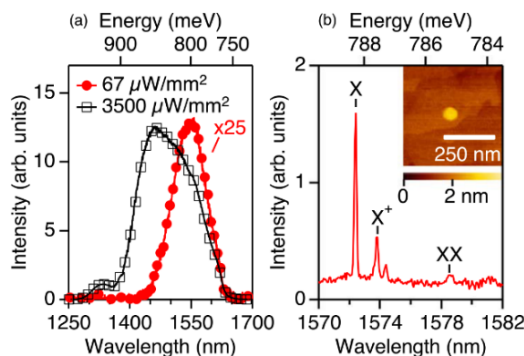


図 5 (a) InP (111) A 基板の InAs 量子ドットのマクロ PL。(b) 単一 InAs 量子ドットの発光スペクトル。挿入図は InAs 量子ドットの原子間力顕微鏡画像。

出典 : N. Ha et al., Appl. Phys. Express **9**, 101201 (2016)
N. Ha et al., Appl. Phys. Express **13**, 025002 (2020)

(3) 励起子アハラノフ・ボーム効果の解析と観測用試料の作製

アハラノフ・ボーム効果は典型的な量子効果である。リング状の半導体試料を用いて電子と正孔の閉回路を形成し、閉じ込め励起子の発光の印加磁場依存性を観測することでアハラノフ・ボーム効果の実証が期待された。しかし、2次元量子リング中の電子・正孔ペア状態に関する解析的な計算と、配置間相互作用の方法による励起子エネルギーの数値計算の結果から、同じ軌道角運動をもつ電子・正孔ペア状態の混成によるエネルギー準位間の反発から、明瞭な実験観測が難しいことが判明した。そこで、電子・正孔間のクーロン相互作用の大きさを調節して、ペア状態の混成の度合いを制御することを目的として、図6(b)に示す、GaAs量子リングとGaAs量子ドットの複合構造を解析した。この複合構造は、図6(a)に示す量子リングの上に、2段階の液滴エピタキシーによって作製された。図6(c)は原子間力顕微鏡による試料構造の実測値に基づく、モデル構造の断面図で、リングとドットには円筒対称性を仮定した。

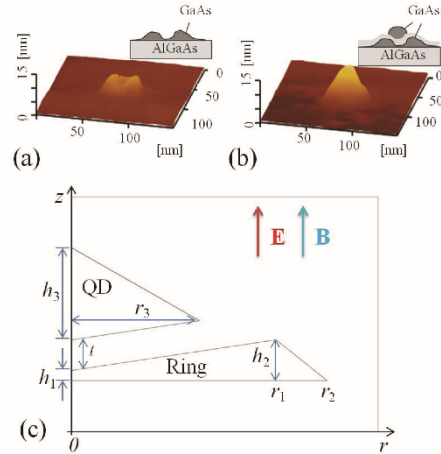


図6 (a) 量子リングと (b) リング上量子ドットの原子間力顕微鏡画像。挿入図はそれらの断面の概略図。(c) 計算に使用したモデル構造の断面図。

ペア状態と励起子準位のエネルギーの印加磁場依存性の計算例を図7に示す。印加磁場の増大に伴って、クーロン相互作用の無い場合(ペア状態)には3T程度の磁場印加で、最低準位が発光性から非発光性に変化する。これに対して、クーロン相互作用を考慮した励起子状態では、このようなエネルギー準位の入れ替わりは生じない。しかし、基板面に垂直な方向に電場を印加すると、電子と正孔の波動関数が空間的に分離されてクーロンエネルギーが減少し、図7(b)のように励起子についても最低エネルギー準位の軌道角運動量の入替わりが生じる。したがって、印加電場と印加磁場の大きさを調節することで、発光性の励起子から非発光性の励起子への急峻な移り変わりが生じるので、励起子アハラノフ・ボーム効果の実験検証が期待される。

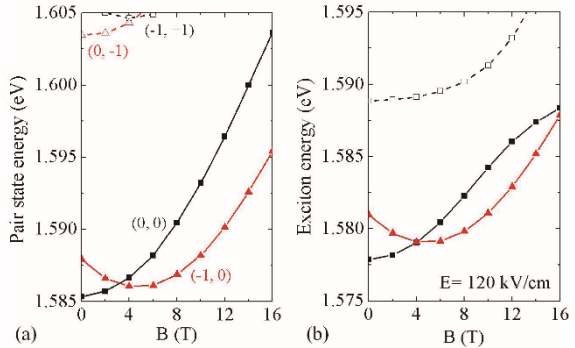


図7 リング上量子ドットの (a) 非相互作用ペア状態と (b) 励起子状態のエネルギーの印加磁場依存性。黒の実線は全軌道角運動量が0の状態、赤の実線は-1の状態。

出典: Y. Yao et al., J. Phys.: Condens. Matter **29**, 385301 (2017)
M. Elborg et al., J. Cryst. Growth **477**, 239 (2017)

(4) パーセル効果による等電子トラップからの単一光子の発光促進

窒素原子のデルタドープにより GaAs 膜に作製した等電子トラップについて、フォトニック結晶光共振器によるパーセル効果を実証した。発光特性の観測は筑波大学池沼道男研究室で行っていただいた。電子線描画と2段階のエッチングにより、図8に示すL3型エアブリッジフォトニック結晶光共振器を作製した。図9に示すように、フォトニック結晶の格子定数を変えて共振周波数を変化させることで、等電子トラップからの発光スペクトルがシフトし、また、発光寿命の短縮が観測されたことから、パーセル効果による発光促進が実証できた。また、光子相関測定により、単一光子発生も確認された。

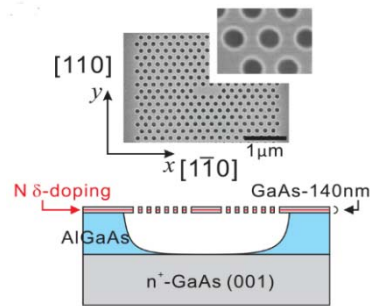


図8 (上) L3型フォトニック結晶光共振器の電顕写真と、(下) エアブリッジ型試料の断面の模式図。

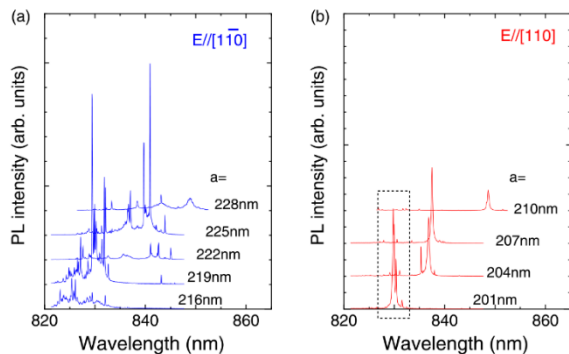


図9 フォトニック結晶の格子定数の違いによる発光スペクトルの変化。

出典: R. Wnag et al., ACS Photonics **7**, 321 (2020)

(5) Cd カルコゲナイドナノプレートの合成と励起子発光の解析

化学合成による Cd カルコゲナイドナノプレート (CdTe, CdS, CdSe, および、それらの混晶) の構造と電子状態について、種々の方法で調べた。合成と構造解析は、主に共同研究先のモスクワ大学化学科の Roman B. Vasiliev グループが行い、低温 PL 測定と k-p 摂動法による電子準位の解析などを主に代表研究者のグループで行った。

図 10 は CdS_xSe_{1-x} 混晶の透過電子顕微鏡写真である。合成された試料は、4~6 原子層の厚みのナノプレートで、面積は最大で 200nm 角程度であり、試料表面にカルボン酸やチオールなどの配位子をもつ。配位子の種類によって、平板状のものから、図 10 に示すような丸まったもの (スクロール) まで、種々の形状を取

る。図 10 (g) の XEDS イメージから、構成原子が試料中に均一に分布することが分る。結晶構造は、XRD や FT-IR でも確認した。

試料の吸収スペクトルと発光スペクトルから、電子準位に関する情報が得られた。このうち、図 11 には $CdS_{0.57}Se_{0.43}$ 試料の PL スペクトルの温度依存性を示す。発光ピーク周波数の温度変化をボーズ関数でフィッティングすることにより、電子-フォノン相互作用の強さとフォノンの平均周波数が得られた。また、可視から近紫外までの光吸収ピークについて、原子層レベルの厚みの違いに起因して、量子閉じ込め効果による吸収/発光ピークのシフトが明瞭に観測された。さらに、このシフトの大きさは k-p 摂動法に依る解析結果とたいへん良く一致した。

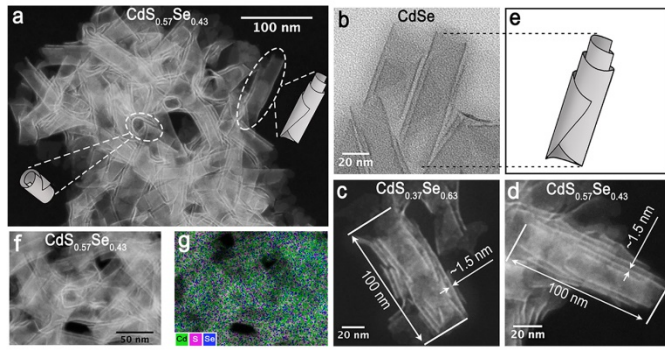


図 10 Cd カルコゲナイドナノプレートの透過電子顕微鏡写真。(a) $CdS_{0.57}Se_{0.43}$, (b) CdSe, (c) $CdS_{0.37}Se_{0.63}$, (d) $CdS_{0.57}Se_{0.43}$ 。(e) 単一のスクロール状ナノプレートの模式図。(f) $CdS_{0.57}Se_{0.43}$ サンプルの拡大図。(g) STEM-XEDS による Cd 原子 (緑), S 原子 (紫), および Se 原子 (青) のマッピング像。

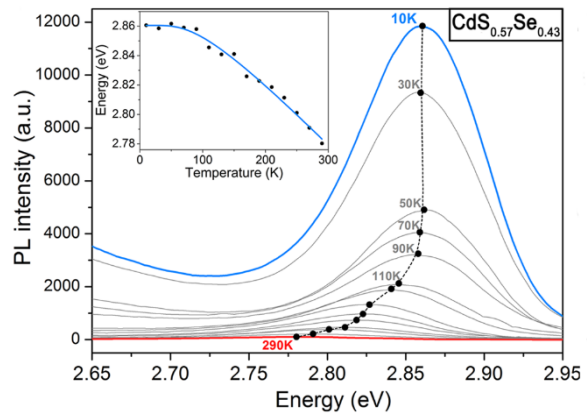


図 11 $CdS_{0.57}Se_{0.43}$ サンプルの PL の温度依存性。挿入図は、PL ピークエネルギーのボーズ-アインシュタイン関数によるフィッティング。

出典 : N. N. Schlenskaya et al., Chem. Mater. **29**, 579 (2017)
R. B. Vasiliev et al., Phys. Rev. B **95**, 165414 (2017)
R. B. Vasiliev et al., Chem. Mater. **30**, 1710 (2018)

(6) トポロジカルフォトリック結晶によるカイラル導波路の解析と設計

量子もつれ光子対の空間分離を目的として、トポロジカルフォトリック結晶のエッジ状態を利用した、一方通行円偏光導波路実現の可能性を調べた。想定した試料構造は、GaAs 薄膜フォトリック結晶 / AlGaAs 下地層 / GaAs 基板から成る 3 層構造である。高 Q 値の導波路モードを得るために、図 8 のようなエアブリッジ構造を作製することが多いが、材質や結晶方位が限定されるといったデメリットがあることから、有限要素法による解析では非エアブリッジ構造を仮定した。下地層の実効屈折率を小さくして、フォトリック結晶層に光を強く閉じ込めるために、フォトリック結晶の空気孔が下地層まで貫通した構造について計算した。

ハニカム格子フォトリック結晶をわずかに変形させた構造を用いて、トポロジカルに非自明なフォトリック結晶と自明なフォトリック結晶の境界に、導波路モードが実現できた。図 12 には導波路 (Edge と記された部分) の単位構造について、導波モードのポインティングベクトルの空間分布を示す。まだ、予備検討段階の成果ではあるが、導波路の分散関係が Γ 点近傍でディラックコーン的である等、エッジ状態の特徴を備えており、今後、さらに検討を加える予定である。

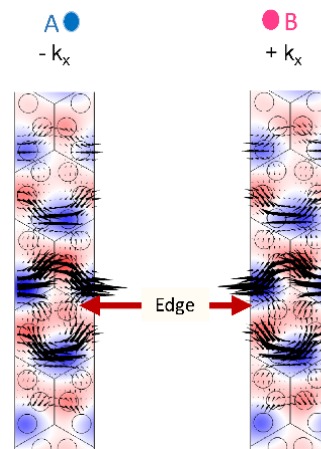


図 12 トポロジカルフォトリック結晶導波路を伝搬する光波のポインティングベクトルの分布。

出典 : A. Begum et al., Poster presentation, A3 Metamaterials Forum (Sapporo, 2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Neul Ha, Takaaki Mano, Samuel Dubos, Takashi Kuroda, Yoshiki Sakuma, Kazuaki Sakoda	4. 巻 13
2. 論文標題 Single photon emission from droplet epitaxial quantum dots in the standard telecom window around a wavelength of 1.55 μm	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 025002/p.1-p.4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ab6e0f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ruoxi Wang, Michio Ikezawa, Yoshiki Sakuma, Yoshimasa Sugimoto, Naoki Ikeda, Hiroyuki Takeda, Kazuaki Sakoda, Yasuaki Masumoto	4. 巻 7
2. 論文標題 Enhanced Spontaneous Emission Rates for Single Isoelectronic Luminescence Centers in Photonic Crystal Cavities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 p.321-p.326
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsp Photonics.9b00616	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Neul Ha, Takaaki Mano, Takashi Kuroda, Yoshiki Sakuma, Kazuaki Sakoda	4. 巻 115
2. 論文標題 Current-injection quantum-entangled-pair emitter using droplet epitaxial quantum dots on GaAs(111)A	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 083106/p.1-p.5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5103217	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Martin Elborg, Takeshi Noda, Takaaki Mano, Takashi Kuroda, Yuanzhao Yao, Yoshiki Sakuma, Kazuaki Sakoda	4. 巻 477
2. 論文標題 Self-assembly of vertically aligned quantum ring-dot structure by multiple droplet epitaxy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 239-242
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcrysgr.2017.03.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Roman B. Vasiliev, Elizabeth P. Lazareva, Daria A. Karlova, Alexey V. Garshev, Yuanzhao Yao, Takashi Kuroda, Alexander M. Gaskov, Kazuaki Sakoda	4. 巻 30
2. 論文標題 Spontaneous folding of CdTe nanosheets induced by ligand exchange	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 1710-1717
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemmater.7b05324	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Manca, G. Wang, T. Kuroda, S. Shree, A. Balocchi, P. Renucci, X. Marie, M. V. Durnev, M. M. Glazov, K. Sakoda, T. Mano, T. Amand, B. Urbaszek	4. 巻 112
2. 論文標題 Electrically tunable dynamic nuclear spin polarization in GaAs quantum dots at zero magnetic field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 142103/p.1-p.5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5024619	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M. V. Durnev, M. Vidal, L. Bouet, T. Amand, M. M. Glazov, E. L. Ivchenko, P. Zhou, G. Wang, T. Mano, N. Ha, T. Kuroda, X. Marie, K. Sakoda, B. Urbaszek	4. 巻 93
2. 論文標題 Magnetospectroscopy of excited states in charge-tunable GaAs/AlGaAs [111] quantum dots	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245412/p.1-p.11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.93.245412	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takaaki Mano, Kazutaka Mitsuishi, Neul Ha, Akihiro Ohtake, Andrea Castellano, Stefano Sanguinetti, Takeshi Noda, Yoshiki Sakuma, Takashi Kuroda, Kazuaki Sakoda	4. 巻 16
2. 論文標題 Growth of Metamorphic InGaAs on GaAs (111)A: Counteracting Lattice Mismatch by Inserting a Thin InAs Interlayer	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Crystal Growth & Design	6. 最初と最後の頁 p.5412-p.5417
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.cgd.6b00899	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Neul Ha, Takaaki Mano, Yu-Nien Wu, Ya-Wen Ou, Shun-Jen Cheng, Yoshiki Sakuma, Kazuaki Sakoda, Takashi Kuroda	4. 巻 9
2. 論文標題 Wavelength extension beyond 1.5 μm in symmetric InAs quantum dots grown on InP(111)A using droplet epitaxy	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 101201/p.1-p.4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.9.101201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Vidal, M. V. Durnev, L. Bouet, T. Amand, M. M. Glazov, E. L. Ivchenko, P. Zhou, G. Wang, T. Mano, T. Kuroda, X. Marie, K. Sakoda, B. Urbaszek	4. 巻 94
2. 論文標題 Hyperfine coupling of hole and nuclear spins in symmetric (111)-grown GaAs quantum dots	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 121302/p.1-p.5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.94.121302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Patchareewan Prongjit, Somchai Ratanathamphan, Neul Ha, Takaaki Mano, Kazuaki Sakoda, Takashi Kuroda	4. 巻 109
2. 論文標題 Type-II recombination dynamics of tensile-strained GaP quantum dots in GaAs grown by droplet epitaxy	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 171902/p.1-p.4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4965873	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Natalia N. Schlenskaya, Yuanzhao Yao, Takaaki Mano, Takashi Kuroda, Alexey V. Garshev, Vadim F. Kozlovskii, Alexander M. Gaskov, Roman B. Vasiliev, Kazuaki Sakoda	4. 巻 20
2. 論文標題 Scroll-like alloyed CdSxSe1-x nanoplatelets: facile synthesis and detailed analysis of tunable optical properties	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 p.579-p.586
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemmater.6b03876	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Roman B. Vasiliev, Alexander I. Lebedev, Elizabeth P. Lazareva, Natalia N. Shlenskaya, Vladimir B. Zaytsev, Alexei G. Vitukhnovsky, Yuanzhao Yao, Kazuaki Sakoda	4. 巻 95
2. 論文標題 High-energy exciton transitions in quasi-2D cadmium chalcogenide nanoplatelets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165414/p.1-p.7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.95.165414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuanzhao Yao, Martin Elborg, Takashi Kuroda, Kazuaki Sakoda	4. 巻 29
2. 論文標題 Excitonic Aharonov-Bohm effect in QD-on-ring nanostructures	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 385301/p.1-p.8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/aa7c90	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計18件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Neul Ha, Takaaki Mano, Takashi Kuroda, Kazuaki Sakoda
2. 発表標題 Quantum entangled photon emitting diodes based on GaAs quantum dots on (111)A: Robustness against increasing temperature
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Neul Ha, Takaaki Mano, Takashi Kuroda, Yoshiki Sakuma, Kazuaki Sakoda
2. 発表標題 Current-injection quantum-entangled-photon-pair emitter using GaAs quantum dots: Robustness against increasing temperature
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 間野高明, Neul Ha, 黒田隆, 野田武司, 佐久間芳樹, 迫田和彰
2. 発表標題 液滴エピタキシー法による InAs/InP(111)A量子ドットの自己形成における高温結晶化過程の導入
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Afshan Begum, Yuanzhao Yao, Yoshihiko Takeda, Kazuaki Sakoda
2. 発表標題 High Q topologically protected chiral waveguide in layered system
3. 学会等名 The 4th A3 Metamaterials Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 アフシャン ベガム, 姚遠昭, 武田良彦, 迫田和彰
2. 発表標題 High Q topologically protected chiral waveguide in layered system
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 間野高明, Neul Ha, 黒田隆, 大竹晃浩, 佐久間芳樹, 野田武司, 迫田和彰
2. 発表標題 液滴エピタキシー法による InAlAs/InP(111)A上InAs量子ドット形成 における InAs下地層の効果
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuanzhao Yao, Martin Elborg, Takaaki Mano, Takashi Kuroda, Kazuaki Sakoda
2. 発表標題 Excitonic Aharonov-Bohm effect in ring-shaped semiconductor nanostructures
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuanzhao Yao, Martin Elborg, Takaaki Mano, Takashi Kuroda, Kazuaki Sakoda
2. 発表標題 Excitonic Aharonov-Bohm effect in quantum dot-ring coupled structures
3. 学会等名 SPIE Photonics West (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Ikezawa, L. Zhang, Y. Sakuma, K. Sakoda, Y. Masumoto
2. 発表標題 Study on coherence time and indistinguishability of single photons from nitrogen im-purity centers in GaAs
3. 学会等名 QD 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Kuroda, N. Ha, T. Mano, Y. Sakuma, K. Sakoda
2. 発表標題 Robustness characterization of entangled-photon emitters based on natural-ly-symmetric droplet quantum dots
3. 学会等名 QD 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 N. Ha, T. Mano, Y. Sakuma, K. Sakoda, T. Kuroda
2. 発表標題 Droplet epitaxial growth of highly symmetric InAs quantum dots on InAl-GaAs/InP(111)A emitting at telecom 1.55 micron-m wavelength
3. 学会等名 QD 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 黒田隆, 間野高明, Ha Neul, 佐久間芳樹, 迫田和彰
2. 発表標題 量子ドットもつれ光子源の安定性について
3. 学会等名 第77回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 N. Ha, T. Mano, Y. Sakuma, K. Sakoda, T. Kuroda
2. 発表標題 Entangled photon emitting diode based on GaAs droplet quantum dots
3. 学会等名 第77回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 間野高明, 三石和貴, 大竹晃浩, Neul Ha, Andrea Castellano, Stefano Sanguinetti, 野田武司, 佐久間芳樹, 黒田隆, 迫田和彰
2. 発表標題 InGaAs/InAs/GaAs(111)A成長時の格子緩和機構
3. 学会等名 第77回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 王若曦, 池沢道男, 張遼, 山田雄太, 佐久間芳樹, 武田寛之, 池田直樹, 杉本喜正, 迫田和彰, 舩本泰章
2. 発表標題 GaAs中の窒素不純物を利用した明るい単一光子源
3. 学会等名 第2回TIA光・量子計測シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 王若曦, 池沢道男, 山田雄太, 佐久間芳樹, 武田寛之, 池田直樹, 杉本喜正, 迫田和彰, 舩本泰章
2. 発表標題 フォトリック結晶共振器による単一等電子発光中心の発光寿命制御
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 王若曦, 池沢道男, 山田雄太, 佐久間芳樹, 武田寛之, 池田直樹, 杉本喜正, 迫田和彰, 舩本泰章
2. 発表標題 等電子トラップを埋め込んだフォトリック結晶共振器による単一光子発生と発光寿命制御
3. 学会等名 日本物理学会2017年春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Yao, M. Elborg, 黒田隆, 迫田和彰
2. 発表標題 量子リング・量子ドット複合ナノ構造の励起子アハラノフ・ボーム効果
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Patrick Meyrueis, Kazuaki Sakoda, Marcel Van de Voorde	4. 発行年 2017年
2. 出版社 Wiley	5. 総ページ数 571
3. 書名 Micro- and Nanophotonic Technologies	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	姚 遠昭 (YAO Yuanzhao)		
研究協力者	ハ ヌル (HA Neul)		
研究協力者	エルボルグ マーティン (ELBORG Martin)		
連携研究者	黒田 隆 (KURODA Takashi) (00272659)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・グループリーダー (82108)	
連携研究者	間野 高明 (MANO Takaaki) (60391215)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主幹研究員 (82108)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	杉本 喜正 (SUGIMOTO Yoshimasa) (60415784)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・ナノテクノロジー融合ステーション・嘱託職員 (82108)	
連携研究者	佐久間 芳樹 (SAKUMA Yoshiki) (60354346)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・グループリーダー (82108)	