

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22710129

研究課題名（和文） 電流注入型通信波長帯単一光子発生器

研究課題名（英文） Electrically-driven single-photon emitter operated at telecommunication wavelengths

研究代表者

宮澤 俊之 (MIYAZAWA TOSHIYUKI)

東京大学・ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構・特任研究員

研究者番号：30569900

研究成果の概要（和文）：

本研究は量子情報技術の中核デバイスである単一光子発生器を電気制御によって、高性能・高機能化を進めるものである。単一光子発生部に用いる量子ドットに関して、電子状態解析からによって、トンネルやクーロンブロッケードを用いた電流注入手法を検討し、共鳴トンネル注入の可能性を示した。一方で、p-i-n 構造とサイドゲートを有したデバイスを作成し、量子ドットへの横方向電場印加によって波長可変単一光子発生の実証などにも成功した。

研究成果の概要（英文）：

Electrically-controlled single-photon emitters were studied in this study. We designed the layer structure of the current-injected single-photon emitters by considering the electronic structures of a InAs/InP quantum dot which emits telecommunication-band single-photons. Wavelength tunable single-photon emitter was successfully demonstrated by using quantum-confined Stark shift of the exciton energy in the biased quantum dot.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総 計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 マイクロ・ナノデバイス

キーワード：単一光子発生器、量子ドット、通信波長帯、荷電励起子、トンネル注入、サイドゲート、p-i-n ダイオード、メサ構造

1. 研究開始当初の背景

次世代エレクトロニクスにおける革新的情報処理技術として期待される量子情報通信について量子計算や量子暗号通信などの実現を目指した研究が世界中で進められている。特に、それらの量子情報処理を実現する量子ビット、単一光子発生およびもつれ光

子対発生のためのデバイス開発は、単一の量子状態や量子状態間の干渉を制御する必要があり、その応用面だけでなく物理の視点からの興味も内包しており、盛んに研究開発がなされている。

中でも単一光子発生器は単一光子パルスを用いた量子暗号通信において長距離化、高

速化を実現するための必須デバイスであり、またもつれ光子対や光子を用いた量子ビットへの応用も可能であり、量子情報処理の中核デバイスとしてその実現を期待されている。

単一光子発生は、Kimble らによって Na 原子からの発光に対して光子相関測定を実施し、同時刻に飛来する光子の検出がないことにより初めて実証された。以来、原子、分子からの発光についても単一光子性の実証がなされているが、これらはいずれも実験系・材料の安定性が低く、有効な光源とは言えなかった。それらを解決する材料として半導体中に自己形成される量子ドットが提案されており、単一の量子ドットからの発光を用いて単一光子発生を実証した報告が数多くなされるようになってきた。特に提案者のグループでは実用化を念頭に置き、光ファイバーの伝送特性に優れる通信波長帯単一光子発生器の研究開発に取り組んでおり、世界に先駆けて光励起による 1.3 μm 帯、1.5 μm 帯単一光子発生の実証や、世界初の 1.55 μm 帯電流駆動型単一光子発生器などを実現させてきた。

一方で上記の量子ドットを用いたデバイスを用いても、実用的な単一光子発生器については、いまだ発展途上であると言える。実用的な単一光子発生器に望まれる性能としては主に、

- (1) 高純度、高いレートの単一光子発生
- (2) 波長可変可能な単一光子発生
- (3) 固体デバイス化による長時間安定動作
- (4) 電気制御による単一光子発生
- (5) 通信波長帯での単一光子発生

などが挙げられる。しかしこれら諸特性を高い水準で満足する単一光子発生器は実現されていない。

2. 研究の目的

今後の実用化または応用のためには、通信波長帯における電気制御型単一光子発生デバイスの特性を大きく改善することが重要であるという考えに至った。そのためには、既に実現している電流駆動型 1.55 μm 帯単一光子デバイスを元にして、量子ドット内の励起子再結合の発光効率の改善・単一光子性の向上を、荷電励起子による再結合発光・共鳴トンネルによる単一キャリア注入、などによって実現可能ではないかという着想に至った。

本研究では、上記背景を踏まえ、単一光子発生器の単一光子純度を向上し、発光の効率を上げる手法を具体的に検討し、量子ドットを有するデバイス構造の最適設計を進めることを目的とする。単一量子ドットを有するダイオードの作製と単一キャリア注入による単一光子発生および荷電励起子による単

一光子発生による高効率化の実現可能性を示す。

また上記のデバイスと並行して、電気制御による波長可変単一光子発生器についても研究を進める。量子ドットの内部に生成される励起子の発光再結合エネルギーは外部から電場を印加することで発生する量子閉じ込め Stark シフトを利用することで達成可能である。そこで p-i-n 構造にサイドゲートを付けたデバイス構造を用いて、横電場印加による単一光子波長の制御についても研究を進める。

3. 研究の方法

単一量子ドットへの共鳴トンネルキャリア注入と荷電励起子状態生成を電氣的に制御することで更なる単一光子発生器の高性能化の可能性を検討する。

単一量子ドットのキャリア注入に関して、トンネル注入とクーロンブロッケードを両立するためには、量子ドットのエネルギー準位の推定だけでなく、電子・正孔のクーロン積分と Charging エネルギーとの比較を詳細に進める必要がある。通信波長帯で良好な光学特性を示す InAs/InP 量子ドットについて、透過型電子顕微鏡像(TEM)から得られた代表的な量子ドット構造を基に、電子および正孔の固有エネルギー・波動関数の計算を行った。また得られた計算結果と実験で観測されている PL, PLE スペクトルを比較することで量子ドットのエネルギー構造を実験的・理論的に理解し、これを基に InAs/InP 量子ドットがトンネル注入デバイスに適用可能であるか検討した。

一方で、量子ドット層を有する p-i-n ダイオード構造をメサ型に加工し、サイドゲートを付けた単一量子ドットデバイスを作成し、波長可変単一光子発生器の実証実験を行った。メサ構造の幅は 200 nm 程度であり、1 V で 20 kV/cm 程度の電場を印加できる。またサイドゲートは量子ドット層の真横に蒸着されており、外部からの電圧印加によって量子ドットの成長方向と垂直な電場を印加出来る。この構造によって量子ドットの励起子発光エネルギーを量子閉じ込め Stark シフトによって制御可能となる。

4. 研究成果

はじめに量子ドットとして実際の InAs/InP 量子ドットの構造をもとに、p-i-n ダイオードの i 層に埋め込んだ場合の電子状態解析を行った。この際、量子ドット成長条件とドープ構造との兼ね合いから InGaAs や InGaAsP などの 3 元および 4 元混晶層も含めた新しいデバイス層構造を検討する必要があると出てきており、その層構造に合わせて量子ドットにかかる歪みの精密な評価をする必要

があった。本研究の予算を用いて購入した応力解析ソフトによって単一量子ドットの種々の混晶層間での歪み量を解析し、混晶ヘテロ接合面でのポテンシャルを推定し、より精密に量子ドット内の量子準位を評価した。図1 (a)は歪計算をもとに計算された励起子再結合発光の基底エネルギー準位である。量子ドットの高さを変えたモデルとマクロPLによって得られた量子ドット発光スペクトルのピークエネルギーが極めて良く一致した。一方で図1 (b)は μ -PL, PLEによる代表的な量子ドットのスペクトルと、計算から求められた励起子エネルギー準位を示す。詳細な歪計算をもとに量子ドット中の電子・正孔のエネルギー状態を試算した結果、実験によるスペクトルと計算値は非常に良い一致を示した。上記の良い計算モデルを基に得られたこれからトンネル注入による単一光子発生器実現に必要な、トンネルレートや発光再結合寿命、また最適電気パルスの時間幅などを設計した結果、実験的に達成しうる井戸層厚みや印加電圧制御でトンネル注入を単一電子レベルで制御可能と分かった。

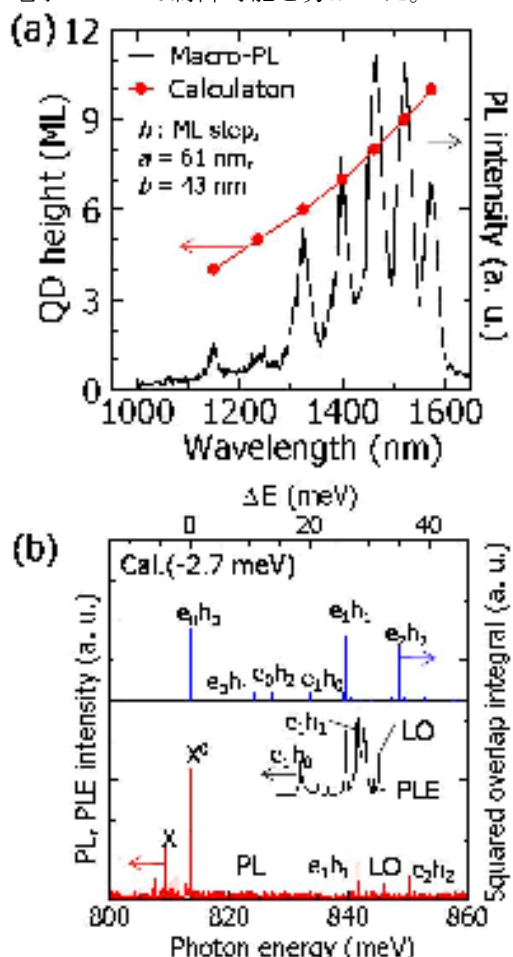


図1 (a) InAs/InP 量子ドットのマクロ PL スペクトルと計算による励起子基底エネルギー (b) InAs/InP 量子ドットの μ -PL, PLE スペクトルと計算による励起子準位

一方で、量子ドットのエネルギー状態解析の手法や電流注入に適したメサ構造・電極構造の設計手法を用いて、1 μ m 帯発光特性を有した量子ドットを p-i-n 構造に埋め込んだ単一光子発生デバイスを作製した。このデバイスはサイドゲートを有しており量子ドットへの横方向電場印加によってドット内量子準位のエネルギー操作が可能であり、波長可変単一光子やトンネル注入時のトンネルレート操作などにも応用可能である。

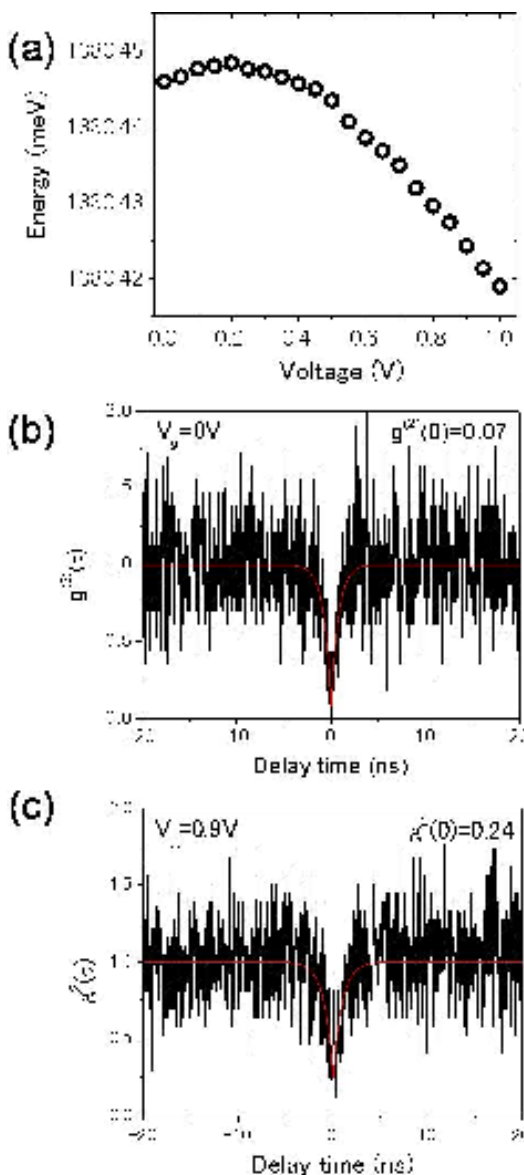


図2 (a) 電圧印加による単一量子ドット励起子発光のエネルギー制御 (b), (c) $V_g = 0$ および 0.9 V における強度相関関数 $g^2(t)$

本研究の予算を用いて導入した高精度ステージを用いて、単一量子ドット発光評価用光学系を構築し、このデバイスのサイドゲートに電圧を印加することで横方向電場を発生させ、量子ドット内の励起子の量子閉じ込

め Stark シフトを観測した。図 2 (a)はサイドゲートに印加する電圧 V_g を変化させた際の量子ドット発光エネルギーを現している。ダイポールモーメント $V_g = 0 \text{ V}$ と 0.9 V とでは $25 \text{ } \mu\text{eV}$ 程度のエネルギーシフト量となる。これは量子ドットの励起子発光ピークの線幅程度は変化させることが可能であることを示している。

また上記の横方向電場を用いて波長可変の単一光子発生を実証することにも成功した。図 2 (b), (c)は $V_g = 0, 0.9 \text{ V}$ の際の強度相関関数 $g^2(t)$ を測定した結果である。いずれの電圧でも $g^2(t)$ の値は 0.5 以下であることから、波長変化可能な単一光子発生の実証に成功したと言える。

これらの結果は、今後の縦方向の p-i-n 構造を用いた電流注入型単一光子発生器にも適用可能であり、今後の電気制御単一光子発生器の中核技術になると考えられる。

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 3 件)

① T. Nakaoka, Y. Tamura, T. Saito, T. Miyazawa, K. Watanabe, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa: Wavelength tunable quantum dot single-photon source with a side gate, Japanese Journal of Applied Physics 査読有り, **51**, 02BJ05 (2012).

② T. Miyazawa, K. Takemoto, T. Nakaoka, T. Saito, S. Hirose, Y. Sakuma, N. Yokoyama, and Y. Arakawa: Effect of electronic structure on single-photon emission in InAs/InP quantum dot with quasi-resonant excitation, Phys. Stat. Sol. (c) 査読有り, **8**, No. 2, 417 (2011).

③ T. Nakaoka, Y. Tamura, T. Saito, T. Miyazawa, K. Watanabe, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa: Direct observation of competing influence of an in-plane electric field on the Stark shifts in a self-assembled quantum dot, Appl. Phys. Lett. 査読有り, **99**, 181109 (2011).

〔学会発表〕(計 2 件)

① 中岡俊裕, 田村悠悟, 渡邊克之, 熊谷直人, 宮澤俊之, 太田泰友, 岩本 敏, 荒川泰彦: 量子ドットを用いた単電荷・スピン・光機能融合デバイス, 第 59 回 応用物理学関係連合講演会(早稲田大学), 15a-F6-3 (2012. 3. 15).

② 宮澤俊之, 竹本一矢, 中岡俊裕, 斉藤敏夫, 佐久間芳樹, 横山直樹, 荒川泰彦: InAs/InP 量子ドットを用いた準共鳴励起単一光子発生器の光学特性解析, 第 71 回 応用物理学学会学術講演会(長崎大学), 16p-NC-14 (2010. 9. 16).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮澤 俊之 (MIYAZAWA TOSHIYUKI)

東京大学・ナノ量子情報エレクトロニクス

研究機構・特任研究員

研究者番号: 30569900

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし