

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 13 日現在

機関番号：33924

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760294

 研究課題名（和文） コラムナ量子ドットを用いたナノ細線フォトトランジスタによる
単一光子検出の研究

 研究課題名（英文） Single Photon Detection by Nanowire Phototransistor Formed by
Columnar Quantum Dot

研究代表者

大森 雅登（OHMORI MASATO）

豊田工業大学・大学院工学研究科・嘱託研究員

研究者番号：70454444

研究成果の概要（和文）：

近年形成技術が大きく進展してきた半導体ナノ構造を用いて、単一光子レベルの極微弱光でも感度のある超高感度光検出器の開発を目的として研究を行った。量子ドットと呼ばれるサイズが 10 ナノメートル程度の微粒子を高度な結晶成長技術により多数結合させることで、長さ 100 ナノメートル程度の細線状の構造を形成し、これに電流を流すことで極微細なナノ電路の作製に成功した。さらにこの構造を用いて光増幅型のフォトトランジスタ素子を試作し、その光検出特性の評価を行った。

研究成果の概要（英文）：

Single photon detectors have been fabricated using semiconductor nanostructures, especially quantum dot (QD) and nanowire structures. The nanowire structure was formed by stacking the QD layers with thin spacer layers. The diameter of the nanowire was approximately 20 nm, while the height can be controlled by varying the number of layers and the thickness, up to about 100 nm. From I-V measurement of the diode structure which includes the nanowire, it was found that the nanowire act as the current transport channel. Using this nanowire current channel, the phototransistor structure was also fabricated and the optical and structural properties were studied.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：薄膜・量子構造・コラムナ量子ドット、単一光子検出器

1. 研究開始当初の背景

PIN フォトダイオードや雪崩型フォトダイオード (APD)、CCD などの半導体光検出器は光通信や医療、環境計測など様々な分野で活用されているが、さらなる高感度化と感度波長域の広帯域化が待たれている。中でも量子暗号通信においては、InGaAs 材料の APD や超伝導光検出器、光電子増倍管などを用いて単一光子検出が行われ、その高性能化が試みられている。最近では半導体自己形成量子

ドットを利用した FET 型検出器 (A. J. Shields ら, 2000) や共鳴トンネルダイオード型検出器 (J. C. Blakesley ら, 2005) などの新構造の単一光子検出器が注目を集めており、既存の検出器と比べて低暗係数率で高速なものが得られつつあるが、性能はまだ十分ではない。したがって、これまでにない新しい検出機構を持った高性能単一光子検出器の開発が急務となっている。

2. 研究の目的

本研究では申請者が考案した新しい光検出素子として、InAs系コラムナ量子ドットとGaSb系Type-II量子ドットを組み合わせて形成されるフォトトランジスタ型の光検出器を用い、既存検出器を凌ぐ高性能な単一光子検出器を開発することを目的としている。コラムナ量子ドットとは、InAs量子ドット層とGaAs薄膜層を交互に多周期積層することで、ドットが成長方向に長く円柱状に成長する半導体ナノ構造である。直径20nm程度で、長さは積層数により自在に制御でき、成長方向に結合していることからナノ細線状の電流チャンネルとしての利用が期待される。さらに、コラムナ量子ドット中もしくは直上にGaSb量子ドットを導入することで、Type-IIと呼ばれるヘテロ構造を構成することが可能で、GaSb部分は電子に対しては障壁に、正孔に対しては井戸となる。そのため、正孔蓄積により電子に対する障壁高さを変化させナノ細線中の電流を増減させるフォトトランジスタ素子を形成することが可能となる。

本研究では、具体的に以下の3課題について段階的に取り組んだ。

(1) InAs/AlGaAsおよびGaSb/InAs/AlGaAs系コラムナ量子ドットの形成技術の確立

(2) コラムナ量子ドットの光学特性と電気伝導特性の評価

(3) InAs/AlGaAsコラムナ量子ドットとGaSb量子ドットを組み合わせたナノ細線フォトトランジスタ素子の電気伝導評価及び光検出特性の評価

3. 研究の方法

コラムナ量子ドットを用いたナノ細線フォトトランジスタ素子は分子線エピタキシー法(MBE)により作製する。以下に、素子の構造と動作原理について説明する。図1(a)に示すようにn型GaAsエミッタ層から流れ出した電子は、コラムナ量子ドット型の細線構造と光吸収用のGaAs層を経由してn型コレクタ層に達する構造を持つ。ナノ細線となるコラムナ量子ドットには図1で示したInAs/AlGaAs系材料を用いる。さらにナノ細線の片端には10nm程度の高さのGaSb量子ドットもしくはコラムナ量子ドットを積層させ、電子に対しては障壁で正孔に対しては井戸となるType-IIヘテロ障壁を導入する。これにより、正孔蓄積により障壁が低減するフォトトランジスタとして機能することが予想される。

素子の暗状態と光照射時におけるバンドダイアグラムをそれぞれ図1(b)と(c)に示す。この素子のコレクタ電極に正電圧 V_b を印加するとナノ細線に電子が流れ込むが、図1(b)の暗状態ではGaSbドットの障壁によってトンネル電流はほとんど流れない。しかし、

素子に光子が入射し吸収されると図1(c)に示すように発生したフォトキャリアのうち正孔がGaSbドットに捕獲され、正に帯電することによって電子に対する障壁が緩和される。これにより、フォトトランジスタの光ゲート動作と同様な効果でナノ細線中の電流が増加するため、光検出が可能となる。

この素子の構造を最適化することで得られる利点は、「ナノ細線中だけに電流が流れるため、暗電流を極めて小さくできる」、「正孔一個の蓄積でもGaSbドットの電子に対する障壁を大きく減少させることができ、大きな電流変化を得られる」ことにある。この特徴を生かせば、既存デバイスより極めて低暗電流かつ高感度な単一光子の検出が期待できる。

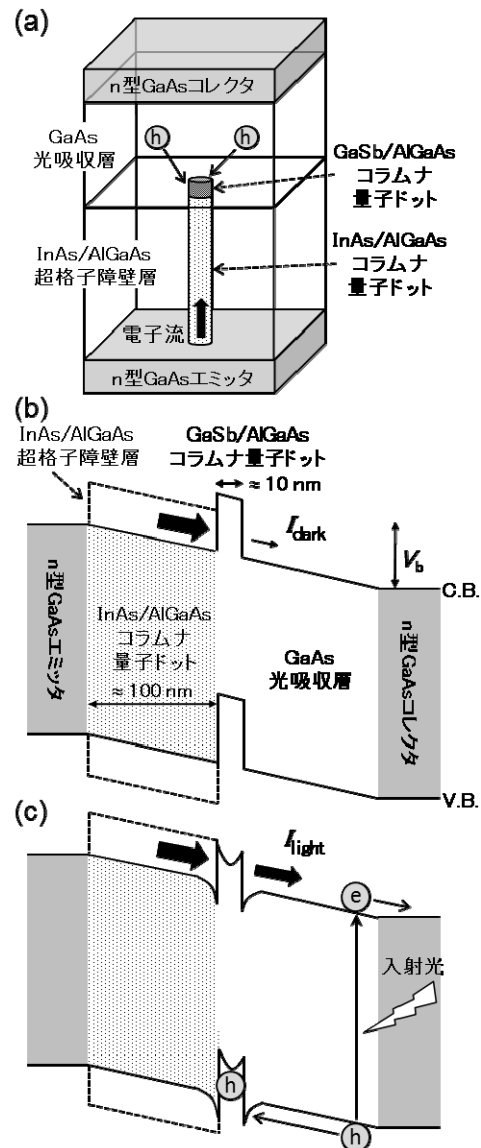


図1. ナノ細線フォトトランジスタ素子の構造とバンドダイアグラム

4. 研究成果

以下に、研究目的で述べた3課題について、研究成果を報告する。

(1) InAs/AlGaAs および GaSb/InAs/AlGaAs 系コラムナ量子ドットの形成技術の確立

まず、InAs/AlGaAs コラムナ量子ドットの形成評価の代表例を図2に示す。コラムナ量子ドットは、GaAs バッファ層上に InAs 種量子ドットを堆積量 1.8ML で形成後、AlGaAs 4ML、GaAs 2ML、InAs 1ML の超格子を 20 周期成長させることで形成した。エネルギー分散型 X 線分光法 (EDX) による Al、Ga、In の各組成比の成長方向に対するラインプロファイルを図2(b)、(c)に示す。図2(b)はコラムナ量子ドット部分を図2(c)は超格子部分をそれぞれスキャンした結果である。Ga の組成はどちらもほぼ同じであるが、CQD 部分は超格子部分と比べ In と Al 組成が逆転している様子が分かる。これは、CQD に集まってきた In

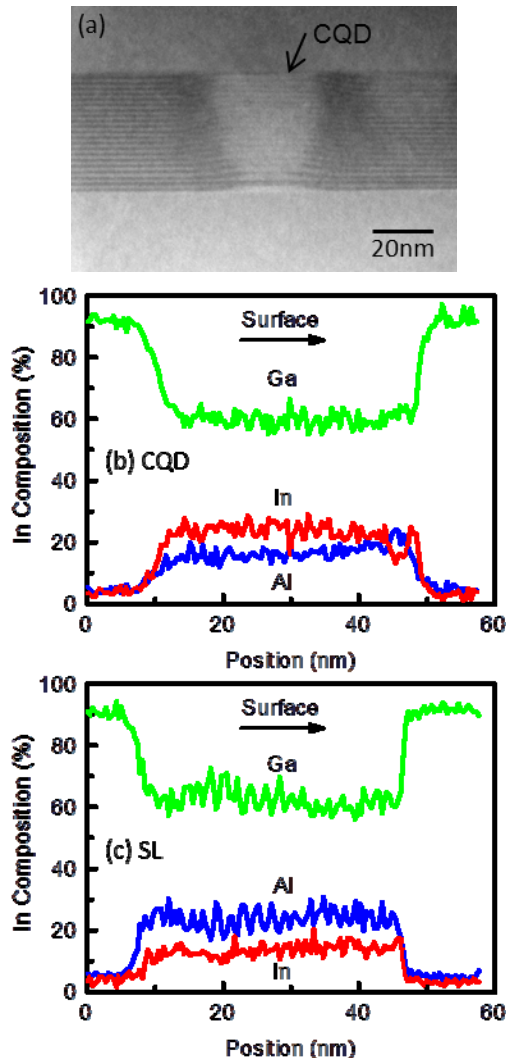


図2. (a) InAs/AlGaAs コラムナ量子ドットの TEM 像。コラムナ量子ドット部分 (b) と超格子部分 (c) の材料組成比のラインプロファイル。

原子が他の原子と入れ替わるとき、In-Ga ボンドが In-Al ボンドより強いため、Al とだけ入れ替わったものと考えられる。この結果は、InAs/AlGaAs コラムナ量子ドットの形成機構とエネルギー状態を制御するうえでの重要な知見であると考えている。

次に、フォトリソグラフィ構造を形成するための要素技術として、GaSb/InAs/AlGaAs 系コラムナ量子ドットの形成評価について説明する。研究開始当初は GaSb/AlGaAs コラムナ量子ドットを InAs/AlGaAs コラムナ量子ドット上に積層する予定であったが、いくつかの成長評価から、GaSb を多数積層すると歪蓄積が大きく転位が高い割合で入ることが分かった。そのため、GaSb/AlGaAs コラムナ量子ドットを積層するのではなく、歪を最小限に抑えるため GaSb 量子ドット単層を積層する方法を用いた。単層でも高さ 10nm 程度と厚いため、障壁層として十分機能すると考えられる。図3に実際に成長した試料の TEM 像を示す。図から、コラムナ量子ドット直上に GaSb 量子ドットが形成され、広域像から転位も発生していない様子が確認でき、良好な素子構造を得ることができた。これにより、本研究において最も重要な要素技術であったナノ細線フォトリソグラフィ構造の形成が可能となった。この構造を用いた光検出特性の結果は後述する。

ここで問題点として、上述の歪み蓄積を抑えた形成手法でも、GaSb を積層しないコラムナ量子ドットのみを試料と比べ低密度ながら転位が存在していることが電気伝導特性の結果から判明した。そのため、素子作製の歩留まりは非常に悪い。この問題を克服するためには、InP 基板上的 InAs と InGa(Al)As などの歪み補償法を適用できる材料系を利用する必要があり、現在準備を進めている。

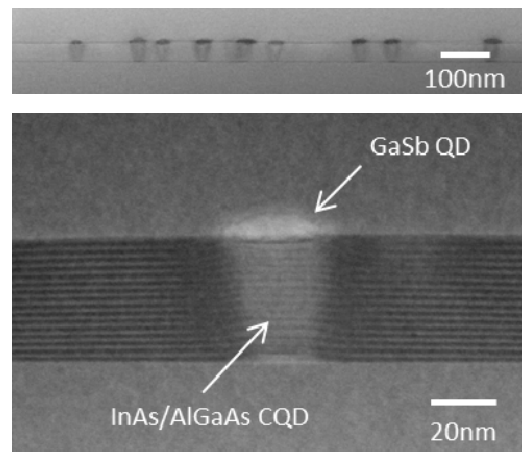


図3. InAs/AlGaAs コラムナ量子ドット上に形成した GaSb 量子ドットの TEM 像。広域像 (上図) と拡大像 (下図)。

(2) コラムナ量子ドットの光学特性と電気伝導特性の評価

種量子ドット上の超格子を AlGaAs 6ML、GaAs 2ML、InAs 1.1ML として作製したコラムナ量子ドットの蛍光測定結果を図4に示す。試料温度 13K において、コラムナ量子ドットからの蛍光ピークが約 1.27eV に確認でき、さらに 1.74eV に超格子層からの蛍光ピークも観測された。参照用の超格子のみの試料と比べ、コラムナ量子ドットを含む試料の超格子蛍光ピークが低エネルギー側にシフトしているのは、エネルギー的に低いコラムナ量子ドットが数十 nm 間隔の高密度で存在しているため、その変調を受けて全体的にエネルギーが下がっているためである。この蛍光スペクトルの測定結果から、超格子部分の GaAs に対するポテンシャル障壁高さは、100meV から 150meV の範囲であることが分かった。

次に、上記コラムナ量子ドットを低密度に成長し、 n_{in} ダイオードの i 層に埋め込んだ試料について、フォトリソグラフィにより $10\mu\text{m}$ 角のメサ状ダイオード素子を作製した。素子の電流電圧特性を測定した結果を図5に示す。単一のコラムナ量子ドットだけを含む5個の素子と、超格子のみの参照用素子に対して測定を行った。超格子のみの試料と比べコラムナ量子ドットを含む素子は低電圧領域でも大きな電流が流れており、ナノ細線1本でも十分微細電流チャネルとして機能することが分かった。しかし、素子間のばらつきが大きく、特性も線形でないため、コラムナ量子ドット中に薄い障壁が存在することが示唆される。そこで、単一コラムナ量子

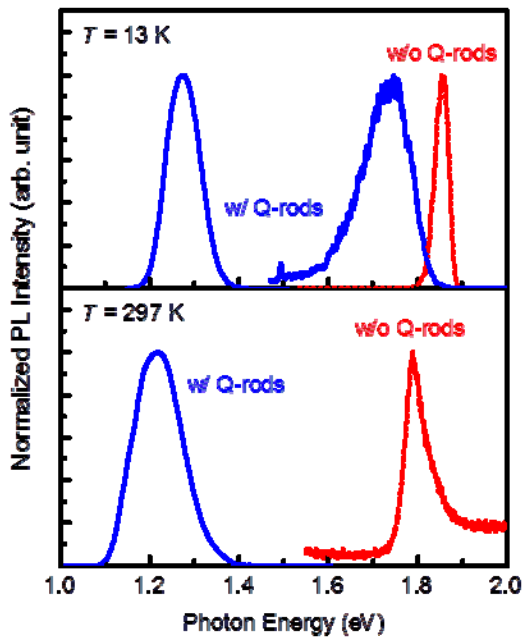


図4. InAs/AlGaAs コラムナ量子ドットの蛍光スペクトル。赤色点線で示すスペクトルは参照用の超格子のみの試料。

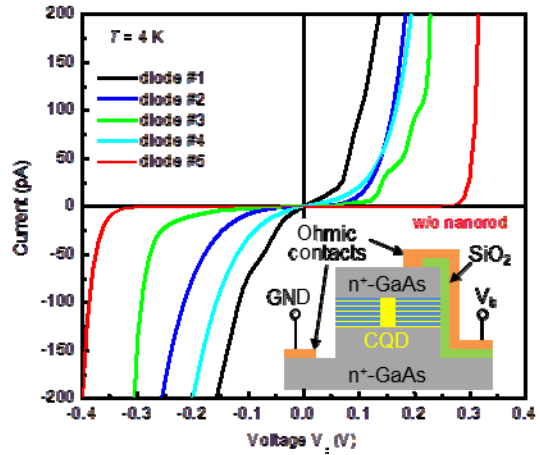


図5. 単一 InAs/AlGaAs コラムナ量子ドットの電流電圧特性。一番外側の赤線は参照用の超格子のみの素子。

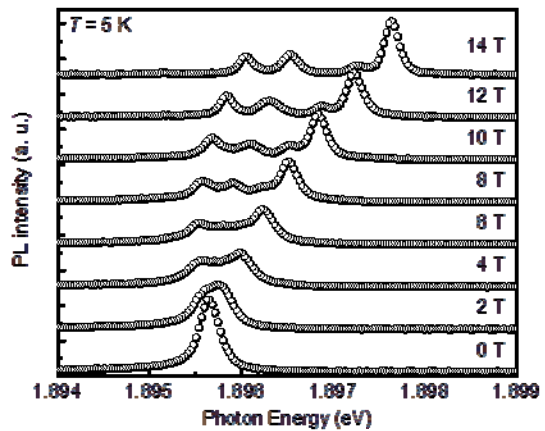


図6. 単一 InAs/AlGaAs コラムナ量子ドットの高エネルギー側ピークの印加磁場依存性。

ドットの顕微蛍光測定を行ったところ、図4と同じ 1.2eV 周辺に量子ドットと同様な鋭いピークが確認できたことに加え、GaAs バンド端よりエネルギーの高い 1.5eV 以上にも複数の鋭いピークが観測された。この高エネルギー側のピークは励起光強度依存性から 1.2eV 周辺の低エネルギー側ピークの励起準位ではなく、独立した準位であることも確認した。この蛍光ピークに対し磁場印可時のスペクトルを測定した結果 (図6)、明瞭なゼーマン分裂が観測され、三次元的な閉じ込め準位からの発光であることが確認できた。この GaAs バンド端より高エネルギー側の閉じ込め準位は、コラムナ量子ドット中の AlGaAs 層の Al 組成や厚さのばらつきによって局所的に数原子層厚の量子井戸構造が成長方向に形成され、周辺との超格子障壁と合わせた三次元閉じ込めを形成していると推測される。観測した単一コラムナ量子ドットのピークは 1.5eV から 1.8eV の間で規則性なく分布し、またピークの存在しないものもあった。したがって、このようなランダムに存在する障壁が図5の電気伝導のばらつきの原因に

なつたと考えられる。このばらつきはAlGaAs層を薄くするか、Al組成を少なくすることで回避できると考えており、現在その検証実験を進めている。

(3) InAs/AlGaAs コラムナ量子ドットとGaSb 量子ドットを組み合わせたナノ細線フォトトランジスタ素子の電気伝導評価及び光検出特性の評価

研究成果(2)で述べたように、GaSb 量子ドットをナノ細線上に積層させると歪みの影響で転位が発生し、素子のリーク電流が大きく十分な特性評価が難しい。本報告では、比較的リーク電流の少ないナノ細線フォトトランジスタ素子について、その光検出特性評価について以下に記す。

図7に作製したフォトトランジスタ素子の暗状態と光照射時の電流電圧特性を示す。照射した光は、メサ上で約0.2pWとなる強度の白色光で、連続して照射してある。メサ中には数個程度のナノ細線が含まれている。図から、光照射によって電流は何桁も増加していることが分かる。これは、GaSb量子ドット中へ正孔が蓄積したことにより、電子電流に対するポテンシャル障壁が緩和されたためである。また、正電圧印加時の方が光電流と暗電流との差が大きいのは、表面付近で発生した正孔がGaSb量子ドットに流入しやすいことに起因している。この測定における光感度は0.2V印加時において約 10^4 A/Wと比較的高いが、暗電流が1nA程度流れているため、単一光子レベルの微弱光の検出は難しいと考えられる。

上記のように、現状ではまだ単一光子レベルの微弱光を検出できる感度は達成できていない。しかし、現在取り組んでいる歪み補償法を用いた素子を用いることで、転位によるリーク暗電流を大きく抑制することが期待できる。そのため高感度を得ることのできる高いバイアス電圧で動作でき、単一光子検

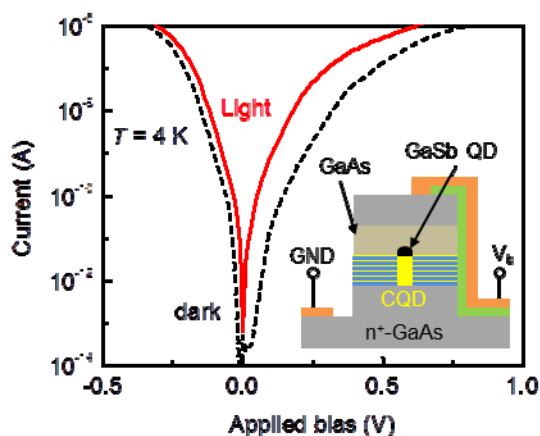


図7. ナノ細線フォトトランジスタ素子の暗状態と光照射時の電流電圧特性。メサに照射される光強度は約0.2pWで、白色光を照射。

出の可能性が高まると予想している。

本研究の成果では、GaSb量子ドット中へ正孔が蓄積することで、ナノ細線中を流れる電流が増加するフォトトランジスタとしての基本原理が検証できた。今後は、これらの知見をもとにより高性能な単一光子光検出器の実現に向けて研究を推進していく。

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1件)

(1) M. Ohmori, P. Vitushinskiy, T. Kojima, and H. Sakaki, Formation of InAs/AlGaAs/GaAs Nanowire Structures by Self-Organized Rod Growth on InAs Quantum Dots and Their Transport Properties, Appl. Phys. Express, 査読有, 6, 2013, 045003 DOI : 10.7567/APEX.6.045003

[学会発表] (計4件)

① 小林由幸, 大森雅登, Vitushinskiy Pavel, 榊裕之, ナノ細線フォトトランジスタの形成と光検出特性の評価, 第72回応用物理学会学術講演会, 2011年9月1日, 山形大学

② 大森雅登, 川津琢也, 野田武司, 榊裕之, 自己形成量子ドットの形成法と光検出素子応用, CRESTシンポジウム「トップダウンとボトムアップの融合によるナノ構造の作製と新機能発現」, 2011年10月17日, 東京大学 武田先端知ビル (招待講演)

③ M. Ohmori, P. Vitushinskiy, and H. Sakaki, Structural and Transport Properties of InAs/AlGaAs Columnar Quantum Dots, 17th International Winterschool Mauterndorf2012, Feb14, 2012, Mauterndorf Austria

④ 大森雅登, Pavel Vitushinskiy, 榊裕之, InAs/AlGaAsコラム状量子ドットを用いたナノ細線の形成と評価, 第59回応用物理学関係連合講演会, 2012年3月16日, 早稲田大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大森 雅登 (OHMORI MASATO)

豊田工業大学・大学院工学研究科・嘱託研究員

研究者番号 : 70454444