

量子フォトンクスのための半導体ナノテクノロジー

Semiconductor Nanotechnology for Quantum Photonics

アンドリュー シールズ

■ Andrew Shields

自己形成量子ドットを利用することで、非古典光の発生・検出を可能とするナノテクノロジーの開発が進められている。既に東芝は、従来の半導体発光ダイオード(LED)の活性層に埋め込んだ1個の量子ドットからの単一光子生成を実証している。今回、量子ドットの結晶成長の最適化により、光ファイバ通信に適した波長の発光が可能であることが実証された。更に、このLED構造と共振器構造とを組み合わせ、単一光子の発光効率を1けた向上させるとともに、キャリアの運動を電氣的に制御することで、1 GHzもの高い繰返し周波数が達成できることも実証した。量子ドット構造は、単一光子検出器の高効率化にも利用される。

Toshiba is making progress toward developing a nanotechnology for the generation and detection of quantum light states using self-assembled semiconductor quantum dots. Previously we demonstrated that a single quantum dot placed within a conventional semiconductor light-emitting diode (LED) acts as a single photon source. It is shown here that the quantum dot growth can be manipulated to achieve an emission wavelength compatible with transmission over optical fiber. Incorporation of a cavity into the LED structure leads to a tenfold increase in the single photon generation efficiency, and electrical control of the carrier dynamics has been used to achieve repetition rates as high as 1 GHz. Quantum dot devices are also demonstrated to be efficient detectors of single photons.

1 まえがき

光の量子論的側面を探求することによって、古典的なフォトンクスでは不可能であった、新たな機能を持つ光学システムを設計することができるようになる。例えば、1個の光子を使った光通信を考えると、受信者は、通信路上で何者かが傍受したかどうかを検出することができる。これは、一見、直観に反するが、単一光子のような量子力学的状態を観測してしまうと、符号化された量子状態は破壊されてしまう、という普遍的な事実の直接的な帰結になっている。

量子暗号のユニークな特徴は、無条件に安全な通信手段を初めて提供する技術であるということである。すなわち、ハッカーの計算機能力の限界といった仮定をいっさい使わずに、安全性が確保されるのである。量子暗号通信は、本質的に安全な通信チャネルを提供するだけでなく、デジタル暗号鍵を自動配信するための、便利で費用効果の高い手段として利用できることから注目を浴びている。欧米では、最近二つのベンチャーが、まだ未熟なレベルの装置ではあるものの鍵配信システムの販売を開始している。

東芝も、光源として光強度を減衰させたレーザを用い、また、光検出器にはアバランシェ フォトダイオード(APD)を用いて、量子暗号通信システムをいち早く開発した。特に、100 kmを超える量子暗号通信を、2003年6月に世界で初めて成功させている。しかし、システムの性能を更に引き上げ

るためには、単に強度を減衰させた光源ではなく、真に単一の光子だけを生成する光源が不可欠になる。

通常のレーザ光源では、いくら強度を減衰させても複数光子の発生確率をゼロとすることができない。このため、高性能な盗聴装置があるとハッカーに情報が漏れてしまう。このような事情から、通常の光源では、十分な秘匿性を確保するために、光強度を強く減衰させる必要があり、その結果として通信速度が低下するという問題が発生する。これを解決し、通信距離と通信速度を高めるためには、完全な単一光子光源の開発が極めて重要となる。

量子暗号システムのもう一つのキー部品は光検出器である。APDは一個の光子が検出可能なほど感度が高いが、ノイズが大きいため、通信の秘匿性を低下させ、通信距離に制約を課すという問題を抱えている。そればかりでなく、APD内で増幅されたキャリアは格子欠陥に捕捉(ほそく)され、その放出に伴い虚偽の検出信号が現れる。この検出エラーを最小限にするために、数MHzといった非常に低いクロック周波数でしかAPDを動作させることができない。これらの課題を克服するためには、APDに代わる高性能な単一光子検出器の開発が必要となる。

量子暗号通信は、量子理論の情報システムへの応用という意味で、最初のものと考えられている。しかし、この研究開発で対象としている量子効果そのものは、光学をはじめとして、他の多くのアプリケーションへの適用が将来期待でき

る。例えば、非古典光子状態を利用することで、近接場光より小さなスポットへ光を集中させることが可能である。量子イメージングと呼ばれるこの現象は、顕微鏡、高密度光記憶装置、あるいは超高解像度リソグラフィーなどへの応用が見込まれている。

2 光通信波長帯での単一光子発生

量子ドットの作製方法は、基板との格子不整合を利用したエピタキシャル成長技術によるものが一般的であり、自己形成量子ドットと呼ばれる。例えば、インジウムヒ素 (InAs) をガリウムヒ素 (GaAs) 基板上に成長させると、InAsは最初、高い内部ひずみを持ったぬれ層と呼ばれる2次元膜として成長する。しかし、平均膜厚が1.6~1.9原子層を超えると、内部ひずみを表面に解放するために、ぬれ層は多数の小さな突起(ドット)を自己形成する。GaAs層を更に成長させてこの突起を埋め込むことにより、平均直径20~40 nm、高さ2~8 nm程度の量子ドットを形成することができる。

当社は、比較的低密度($\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$)において、発光波長が約900 nmの量子ドットを形成する方法を開発している。このような低密度であれば、1個の量子ドットからの発光を空間的に分離することが可能であり、その発光が単一光子であることも実証している。

最近、光ファイバ通信波長帯域である1,300 nmで発光する量子ドットの開発に取り組んでいる。このような長波長帯の自己形成量子ドットは、光通信用LEDやレーザ、光学増幅器応用を目的として、従来から開発されてきた。これら従来の用途では、大きな量子ドットを高い密度(10^{11} cm^{-2} 以上)で成長させる必要があるが、InAs層を厚く積層することで、比較的容易に達成できていた。

しかしこの方法では、単一光子光源に必要とされる大きなサイズの量子ドットを低密度で成長させることは困難であった。当社は、量子ドットの形成プロセスに第二の臨界膜厚が存在し、これ以上の厚さになると量子ドットが選択的に

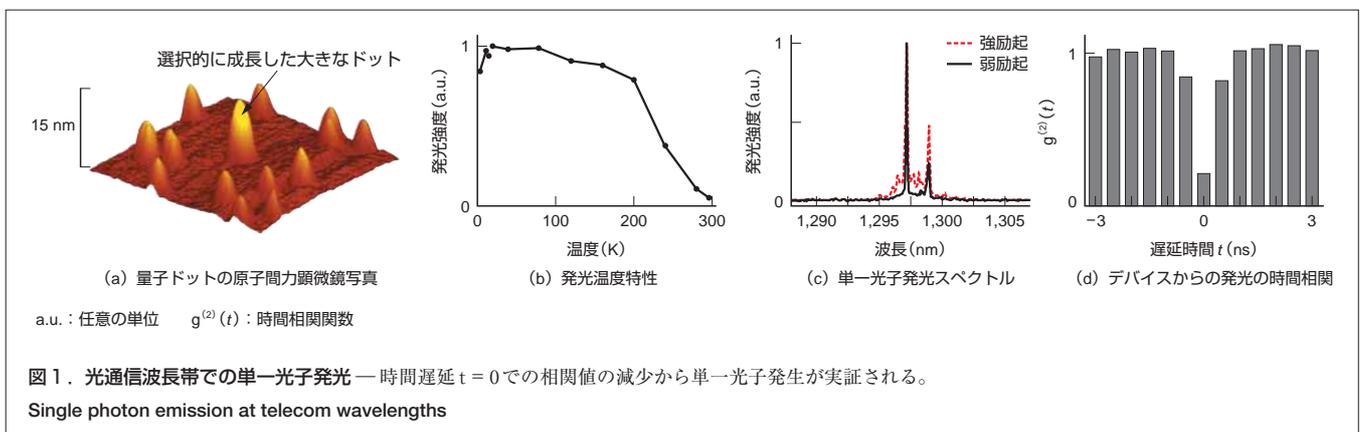
高く成長することを発見した(図1(a))。これにより、光通信波長帯の単一光子光源用に大きなサイズの量子ドットを任意の低密度で形成することが可能になった⁽¹⁾。

長波長で発光する大きな量子ドットは、約900 nmで発光する小さな量子ドットよりも、より高温まで発光が持続している。図1(b)に示すように、220 Kでの蛍光強度は極低温での50%程度である。この温度であれば、熱電冷却器により容易に実現できる。更に高温で動作させるためには、量子ドットを囲むクラッド層のポテンシャル障壁を高くして、量子ドットからキャリアが熱励起で逃げないようにすればよい。

一個の量子ドットからの発光を分離するために、直径 $2 \mu\text{m}$ の柱の頂上にだけ量子ドットが残るようにデバイスを加工した⁽²⁾。異なるレーザ励起強度での蛍光スペクトルを図1(c)に示す。光励起強度が強いと、いくつもの発光線からなる幅広のピークが共振器モードに結合しているのがわかる。この幅広のピークの両側は、光ファイバへの結合が弱く、平らなスペクトルになっている。一方、光励起強度が弱いと、特に強い発光が波長約1,297.2 nmで観察されている。この発光線が、1個の電子と1個の正孔とが結合した励起子によるものであることは、別途確認されている蛍光強度の励起強度依存性が直線的なふるまいを示すことから判断される。量子ドットからの発光線幅が狭いことから、光ファイバ中での分散が小さいことが予想できる。

このように作製したデバイスからの発光が単一光子になっていることを、次の手順で検証した。図1(d)は、デバイスからの光を単一モード光ファイバに導き、ビームスプリッタで分けた後、各々の光に時間遅延を設けて光検出器で観測したときに得られる時間相関を表す。 $t=0$ の相関値は、それ以外の領域の平均値よりも明らかに小さく、2光子同時発生が抑制されていることを示している。

有限の遅延時間相関の平均値(± 250 個の相関値)を基に計算すると、 $t=0$ の相関値は発光の光子数がポアソン分布(通常のレーザの光子数分布)していると仮定した値の約19%であった。この19%のうち、量子ドットから2光子以上



が同時放出された効果によるものが約10%であり、残りの9%が測定システムに依存する誤差と見積もられた⁽²⁾。更にドット密度を低減し、ほかの層からの放射も抑えることで2光子の発生割合を更に減じ、より高性能な単一光子光源を作製することが可能である。以上のことから、量子ドットによって、多光子放射を抑制したオンデマンド単一光子発光源が実現できると結論される。

3 単一光子LED

当社は、2001年末に世界で初めて、単一光子を発生するLEDを発表した⁽³⁾。このLEDは、GaAs PIN (Positive Intrinsic Negative) 構造の活性層に、900 nm 波長帯の光子を放出する1個の量子ドットを配置している。この構造では、光は等方的に発光するため、集光レンズを用いてもごく一部分だけしか集められなかった。そこで当社は、デバイスからの光子収集効率を高め、量子暗号に十分な効率を持つ単一光子LEDを開発した。

高効率な単一光子LEDは、LED構造に共振器構造を導入することで達成した⁽⁴⁾。量子ドットの上部及び下部にミラーを配置することで、ドットからの放射パターンを変えることができる。特に、レーザと同じように、発光波長を共振器モードに合わせて、ミラー面に垂直な方向に光子を発生させることができる。当社の最初のデバイスでは、ドットの下部にブラッグ反射層を配置し、また上部の光反射面としては、半導体と空気層の界面を用いた(図2(a))。デバイスからの発光スペクトルは複数の鋭いピークになっており、単一の量子ドット内に形成された複数の励起子遷移に由来するものである(図2(b))。このような比較的単純な共振器構造にもかかわらず、集光レンズへの絶対的な集光効率は約 $4.7 \pm 0.5\%$ となった⁽⁴⁾。これは共振器を設けない素子の10倍であり、量子暗号システムへの応用に十分な値である。

このデバイスがパルス電流励起により一度に光子一つを放射することを確認するため、図2(c)で示される分光器

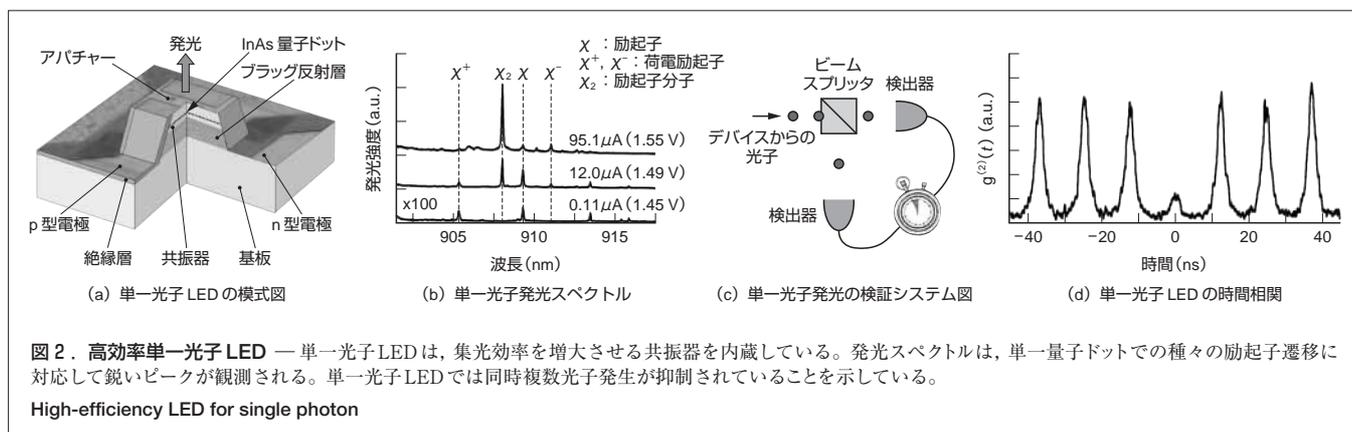
及び二つの光検出器から成る測定装置を構成した。前章の図1(d)も同様の測定系で計測した。分光器は0.5の確率で光子を反射又は透過するため、光源が完全な単一光子の場合は、分光器から等しい距離に置かれた二つの光検出器で同時に検出信号を発することはない。二つの光検出器間での信号の時間相関を図2(d)に示す。 $t=0$ 時の相関値がそれ以外のピークに比べ小さな値を示している。これは、通常のLEDやレーザに比べて、今回試作されたLEDでは2光子同時発生が抑制されていることを示す。 $t=0$ での相関が有限値をとるのは、量子ドット以外の層からの発光が混入したためと考えられる。

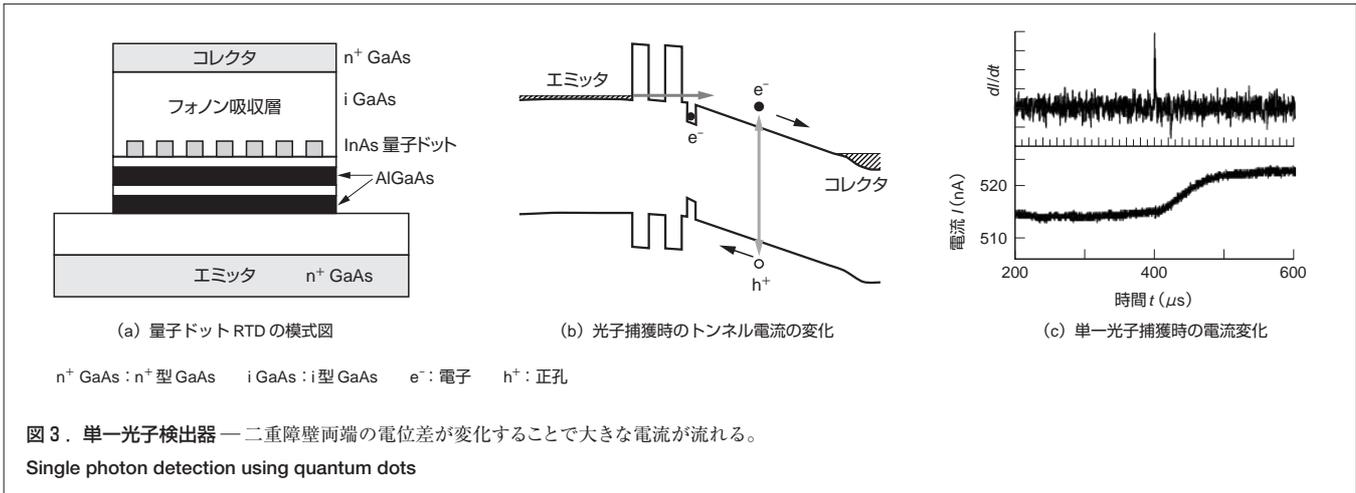
この発光デバイスを高速で動作させるときに障害となるのは、電流パルス投入から発光までの時間遅れ(以下、ジッタと呼ぶ)である。通常、発光のジッタは、量子ドット内での電子と正孔の再結合寿命によって決定される。当社は、注入電流パルスのバイアスを小さくすることにより、電子及び正孔を量子ドット外へ引き出すことが可能であることを発見した。これは、発光のジッタが電圧で制御可能であることを意味し、量子暗号鍵の送信タイミングのエラーを減少させることができる。実際に、このジッタを光子寿命まで小さくすることが可能である。この性質は量子計算機応用においても有益であろう。この技術を駆使して、1 GHzを越える周波数で動作する単一光子LEDを実証した⁽¹⁾。

4 量子ドットを利用した高効率単一光子検出器

当社は、量子ドットを用いた単一光子検出器の開発を2000年5月に世界で初めて成功しているが、2005年には、更に新型の光子検出器を考案し、単一光子の検出効率を10%以上に高めた⁽⁵⁾。このデバイスの基本構造は、GaAs/AlGaAs (アルミニウム ガリウム ヒ素) 共鳴トンネル ダイオード (RTD) で、特徴的なことは、二重障壁に接近してInAs量子ドットを配置していることにある(図3(a))。

RTDのエミッタからコレクタに流れる電流は、エミッタのエ





エネルギー準位と二重障壁で挟まれた量子井戸のエネルギー準位との位置関係に非常に敏感である(図3(b))。二つのエネルギー準位が等しくなるように外部の電圧を設定すると、デバイスは共鳴状態となり、大きな電流が流れる。

この光検出器では、トンネル電流が二重障壁の両端での電位差に敏感であることを利用して、単一光子を検出する。光励起された正孔が量子ドットに捕獲されると、電子と再結合し、量子ドットでの電位が低下して二重障壁の電位差を変えるので、検出器に流れる電流が鋭く変化する。

単一の光子が捕獲されたときのデバイス電流の変化を図3(c)に示す。この図で、電流上昇の応答時間は計測装置の性能で制限されている。このような電流ステップが起こる頻度は、単位時間に入射する光子数に比例しており、量子効率は12%と計算された。このデバイスにバンドパス増幅器を設けることで、電流のステップ的增加を図3(c)に示すパルス出力に変換できる。この単一光子捕獲に由来するパルスは、雑音レベルよりも明らかに大きく、通常のパルス計測回路で実時間計測が可能である。一般的に、デバイスと電子機器を統合したシステムでは $10^{-8} \sim 10^{-5}$ カウント/ns程度の暗電流があるため、単一光子検出効率は1~5%になる。この検出効率はAPDの検出効率の最高値に匹敵する。量子ドットを利用した光検出器は、はるかに高いクロック周波数で動作が可能であるため、より高速な量子鍵配信を実現できる可能性がある。

5 あとがき

これまで述べてきたように、量子ドットを単一光子光源や単一光子検出器に応用することは非常に魅力的である。APDは本質的にアバランシェ増幅過程でノイズを発生するが、これを避けることができると、より長距離で高速な量子暗号通信を実現することが可能である。更に、単一光子検出器は、単一光子の感度を用いる医用画像や化学分析といった、既

存技術の技術革新につながる可能性もある。量子ドット単一光子光源は、現在の量子暗号通信システムが抱えるレーザー光線からの複数光子の同時発生によるセキュリティ上の欠陥を解消できる。

量子情報の最初の応用例は量子暗号通信と予想されているが、その分野は多岐にわたる。この研究で開発されている単一光子光源や単一光子検出器は、今後、量子イメージング、量子テレポーション、及び量子コンピューティングといった、より高度なアプリケーションの主要部品へとつながっていくと考えられる。当社は、将来の社会に様々な利益を提供できるような、安価で高効率な単一光子デバイスの開発に今後も取り組んでいく。

文献

- (1) A. J. Bennet, et al. Electrical control of the uncertainty in the time of single photon emission events. *Phy. Rev. B*, **72**, 033316, 2005, 4p.
- (2) M. B. Ward, et al. On-demand single-photon source for 1.3 μm telecom fiber. *Appl. Phys. Lett.* **86**, 201111, 2005, 3p.
- (3) Z. L. Yuan, et al. Electrically driven single-photon source. *Science*, **295**, 5552, 2002, p.102 - 105.
- (4) A. J. Bennet, et al. Microcavity single-photon-emitting diode. *Appl. Phys. Lett.* **86**, 181102, 2005, 3p.
- (5) J. C. Blakesley, et al. Efficient Single Photon Detection by Quantum Dot Resonant Tunneling Diodes. *Phys. Rev. Lett.* **94**, 067401, 2005, 4p.



アンドリュー シールズ Andrew Shields, Ph.D.

東芝欧州研究所 ケンブリッジ研究所 量子情報グループ
グループリーダー, 理博。量子情報デバイス及び量子情報通信
の研究・開発に従事。

Toshiba Research Europe Ltd., Cambridge Research Lab.

和訳

黒部 篤
研究開発センター副所長

佐田 豊
東芝欧州研究所 ケンブリッジ研究所副所長