

量子情報通信を実現する単一光子発生器

Key Device for Quantum Communication: Single-Photon Generator

あらまし

単一光子発生器は、光子が1個に制限された光パルスを生成する量子光源である。人工光源として広く使われているレーザーは誘導放出と呼ばれる量子力学的な原理で光を生成するため、その技術は量子エレクトロニクス（または量子光学）とも呼ばれるが、レーザー光自身は無線通信で利用している電波と同様、古典的な波としての性質を強く持っている。一方、単一光子発生器の場合は、生成プロセスだけでなく出力される光パルスも極めて量子的な特性を持つ。したがって、安全性の高い量子暗号や量子情報処理のキーデバイスとして期待されているが、実際に利用できる単一光子発生器はいまだ存在しない。富士通研究所は東京大学と共同で、単一光子発生器実現に向け、光ファイバ伝送に適した波長帯において単一光子パルスの発生と伝送に世界で初めて成功した。

本稿では、単一光子発生器技術および通信波長帯単一光子発生器の開発について紹介する。

Abstract

A single-photon generator is a light source that generates an optical pulse consisting of a single photon. Even though laser technology is a branch of quantum electronics/quantum optics (because laser light is generated by a quantum-mechanical process), the laser is quite different from the single-photon generator because laser light is more like a classical wave, for example, a radio wave. On the other hand, with the single-photon generator, both the generation process and the generated optical pulse have quantum characteristics. The single-photon generator is expected to become a key device for quantum information processing and highly secure quantum encryption. However, a single-photon generator that can be put to practical use does not yet exist. Fujitsu together with the University of Tokyo have become the first in the world to generate and transmit a single-photon pulse that has a wavelength suitable for optical fiber transmission, and we expect to build a practical generator within several years. In this paper, we describe our development of single-photon generation technology.



白杵達哉（うすき たつや）
ナノテクノロジー研究センター
所属
現在、量子デバイス開発およびデ
イス物理の研究に従事。

まえがき

我々が日常目にする光は古典的な波として理解してよい。一方、光の強度を低くした特殊な状況では、波の性質だけでなくエネルギーが量子化された粒子（光子と呼ぶ）としての性質が顕著に現れる。光子の振る舞いは量子力学で説明されるが、そのエネルギーは極端に小さい。光通信に使われる光パルスの場合、出力1 mWで周波数10 GHzの光パルスは1パルスあたり 10^{-13} Jのエネルギーしか持っていないが、それでもこのパルスには約80万個もの光子が含まれる。したがって、光通信の光パルスでも量子力学の助けが必要な現象は厄介な雑音などに現れるだけで、光パルス強度はほぼ連続量と見なせる。

しかし最近、光子が持つ量子力学的性質を積極的に利用する技術が世界中の研究機関で盛んに検討されている。量子情報通信と呼ばれるこの新分野では、単なる通信技術でなく、セキュリティやコンピュータの計算能力向上にも将来影響を与える様々な技術が提案されている。その中でまず具体化されそうなのが、量子暗号技術である⁽¹⁾

本稿では、まず量子暗号技術の必要性について述べ、そして量子暗号を実現する上で不可欠な単一光子発生器技術、および通信波長帯単一光子発生器の開発について紹介する。

量子暗号技術の必要性

インターネットなどの通信技術の普及に伴い、利用者のプライバシーを守る暗号は日々その重要性を増している。現在広く使われている暗号技術は、コンピュータの計算能力向上を予測した上で、コンピュータで解読困難な鍵^{かぎ}を利用している。適切にデータを暗号化すれば十年程度で破られることはないから、通常の用途には現在の暗号技術は極めて有用である。しかし盗聴者が盗んだデータを長期間保存して、コンピュータの能力向上や新しい解読法が発見されるのを待てば、暗号化されたデータは解読されてしまう可能性がある。前述したように、光通信では数十万個の光子に1ビットの情報を乗せるため、少数の光子が通信網から盗まれても検知は難しい。その上、たった1個の光子を受信する技術は既に存在している。したがって、数十年または百年以上守る必要がある情報を伝達するには、今までの暗

号通信と異なる新しい技術が必要である。重要な国家機密を管理する官公庁や、長期間顧客の信用を得なければならない金融業務には重要な問題であろう。将来、バイオ技術が発展して世代を超えて重大な影響を与える遺伝子情報が行き来するようになると、個人のプライバシーにも上記の問題はかかわってくる。そこで計算能力に依存せず、物理法則によって盗聴自体を検知できる量子暗号が注目されている⁽²⁾

量子暗号は一つの光子、または少数の光子にデータを暗号化する鍵を乗せる。単一光子はそれ以上分割することはできないし、情報をコピーするために観測を行えば必ずその量子状態に痕跡を残す。つまり、量子暗号によって安全に暗号鍵を配布することが可能になる。ただし、図-1に示すように、いかに強固な暗号通信でも情報を共有する拠点からの人為的なリークを防ぐことはできない。この技術のメリットを理解するには、量子暗号が守るのは拠点間の通信網であることに注意しなければならない。

ここで、利用者が現在の暗号でデータを伝送する場合を想定してみる。リークを防ぐために集中的に情報拠点を管理すれば、盗聴者は伝送路に重点を置いて盗聴を試みるであろう。情報拠点は点で守ることができるが、伝送路は線または面で盗聴を防ぐ必要がある。盗聴者が十分なコストをかけるなら（つまり、そのコストに見合う貴重な情報を利用者が伝送するなら）、現在の暗号で送ったデータを盗むことは容易である。盗聴を防ぐには、伝送路全体を情報拠点と同じレベルで監視するなどの対策が必要であるが、どうしても盗聴者より大きなコスト（情報が持つ価値より大きなコスト）が利用者側に発生し

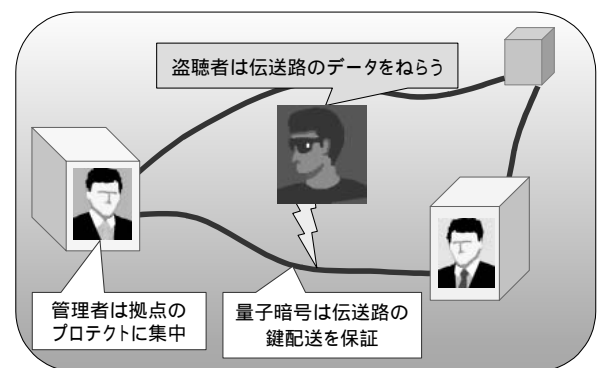


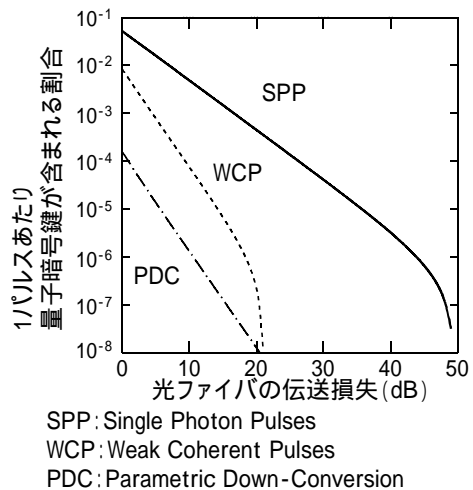
図-1 量子暗号の用途
Fig.1-Application of quantum encryption.

てしまう。伝送路全体を監視する対策よりは量子暗号を利用の方が容易なので、ニーズが高まれば量子暗号技術は普及するであろう。

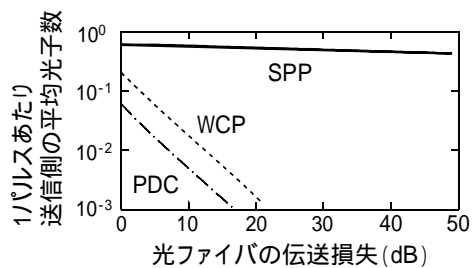
一方、未来の計算機技術として注目されているのが量子計算である。この技術も実は暗号と密接に絡んでいる。先ほど現在の暗号はコンピュータの計算能力では解読困難な鍵を利用していると述べたが、量子計算アルゴリズムを用いれば解読可能であることが既に示されている。この問題の重要性から、大学を中心として基礎研究が盛んに進められている。実際に1,000ビットもの量子計算を行えるようになるのはまだ先の話であるが、そのほかにも計算量が少なくてよい様々な量子情報処理技術が提案されており、その進展が期待されている。³⁾ 演算を担うハードウェアについても様々な量子状態の利用が試されている。量子状態としては、電子のスピンや超伝導状態、または原子そのものも対象となる。しかし、外部環境の影響を受けた量子状態は非常にもろく（量子暗号はこのもろさを逆に利用している）、電子スピンなどの量子状態はたとえ1 m離れた場所への伝送でも現在の技術では崩れてしまう。我々が生活している環境下では、相互作用の小さな光子による伝送が唯一の手段となる。とくに、光通信で利用されている波長1.3~1.55 μm （以下では、通信波長帯）の光子を光ファイバで伝送すれば、量子状態を10 km以上の長距離でも低損失で伝えることが可能である。

単一光子発生技術

量子情報を安定に伝送できることが光子の持つ特徴であるが、その光子を任意のタイミングで一つだけ発生させることは実は難しい。量子情報を光子に書き込むのは偏光や位相変調が可能であるし、一つ的光子を読み取ることもいくつかの問題はあるが可能である。つまり、生成 変調 伝送 受信の各プロセスの中で生成が最も困難な技術課題を有している。最初に述べたように極端に光量を少なくすれば、レーザー光でも光子としての性質が現れるが、光子数を制御していないため、一つのパルスの中に二つ以上の光子を含む可能性が常に存在する。量子暗号で二つ以上の光子に同じ情報を書き込めば、盗聴を許してしまう。また、光子を用いた量子情報処理においても⁴⁾ 光源が光子の単一性を保障していないと



(a) 量子暗号鍵生成と伝送損失の関係



(b) 送信側の平均光子数と伝送損失との関係

図-2 各光パルスの比較

Fig.2-Comparison between several types of photon pulses.

うまく演算できない。

とは言え、長距離伝送できる単一光子発生器がいまだ存在しない以上、量子暗号ではレーザー光を単一光子パルス（SPP：Single Photon Pulses）^{（注1）}の代わりに利用して試験が行われている。複数光子の同時発生をできるだけ少なくするため、レーザーでは光子が存在する平均値を1より十分小さくする必要があるのである。このような光パルスはWeak Coherent Pulses（WCP）^{（注2）}と呼ばれる。図-2に示すように伝送距離が長くなると（即ち伝送系の損失が大きくなると）、SPPに比べWCPは空の光パルスが増大し通信速度が大幅に低下してしまう⁵⁾（現在でもプロトコルの改良は進んでいるが⁶⁾ その評価は今後

（注1） 単一光子発生器によって生成した光パルス。減衰させたレーザー光を用いる方法に比べ、量子暗号通信の速度および距離を伸ばすことができる。
 （注2） レーザー光を減衰器で弱めた光パルス。現在の量子暗号ではこの方式を用いる。平均光子数はほぼ0.1個以下で、距離が伸びると更に平均光子数を落とす必要がある。

の課題である。)量子暗号の実用化やその後の量子情報処理技術の発展を考えると、単一光子発生器の開発はやはり正面から取り組むべき重要課題である。

単一光子を発生させるには、レーザや電流注入で励起状態(光子を放出できる状態)にある電子を作り出し、量子ドットのようなナノメートルスケールの構造に閉じ込める方法が一般的である。もし複数の電子が量子ドット内に存在すると、互いの電気的相互作用により発光波長が変化するので、フィルタを通してやれば目的の単一光子パルスを取り出すことができる。このように少数の電子間で起こる強い非線形性現象が単一光子パルスを生み出す。量子ドットのほかにも不純物や分子のように小さな場所に電子を閉じ込めることができれば、原理的には単一光子源の候補となる。しかし、長距離伝送に適した波長、伝送レートにかかわるパルス長、発光効率、耐久性などの諸条件を満たすものは量子ドットのみである。

通信波長帯単一光子発生器の開発

量子ドットは、半導体量子ドットレーザなどの光通信デバイス応用の目的として様々な研究機関が検討してきた材料である。富士通研究所も、レーザ、光増幅器、波形整形や波長変換器の実用化技術として研究開発を進めている。ほかの材料に比べて単一光子発生器実現に有利なのは明らかであるが、それでも長波長で発光する単一量子ドットを開発するのは難しい。レーザ応用などの量子ドットは半導体中に高密度に存在するが、単一光子源ではたった1個の量子ドットを用いるので逆に低密度がよく、量子ドットの成長方法や条件を検討し直す必要がある。また、単一光子発生は低温にして熱の影響を排除してから行うので、より長波長化への要求が厳しくなる(温度が下がると発光波長が短くなる)。

技術的な壁はほかにもある。せっかく量子ドットが単一光子を発生しても、この光子を光ファイバまで効率良く伝えなければならない。量子ドットに用いる半導体は3以上の高い屈折率を持つ。ダイヤモンド(屈折率2.42)がそうであるように、半導体中の光は表面で全反射しやすく外に取り出しづらい。うまく取り出したとしても、光ファイバの直径10 μm 以下のコア部分に開口率(NA: Numerical Aperture)が0.1程度の小さい角度で光子を導入さ

せなければならない。光ファイバに光子を導入した後も、余分な光を遮断するフィルタの設置、単一光子を検知・評価する観測系の構築が当然必要である。

以上、開発のための課題は次の三つにまとめることができる。

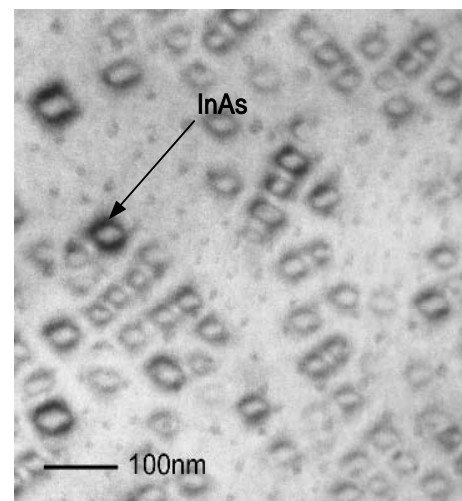
- (1) 通信波長帯量子ドット成長技術
- (2) 単一光子発生素子開発技術
- (3) 発生素子から単一光子観測系までの光学システム構築

今回著者らはこれらのハードルを解決し、世界で初めて通信波長帯単一光子パルスの検証実験に成功した。まず、専用の量子ドットを得るために、独立行政法人 物質・材料研究機構と共同で通信波長帯向けの量子ドット成長技術を開発した^{(7),(8)} 成長した量子ドットを図-3に示す。開発した量子ドットは通信波長帯で、量子状態に対応した鋭い発光特性を示す。

つぎのステップで重要となるのが、単一光子パルスを発生させるための発生素子開発である。東京大学先端科学技術研究センター荒川泰彦教授と共同で、単一光子発生素子を作製した{図-4(a)}。メサ型の光学構造は光学シミュレーションによって効率良

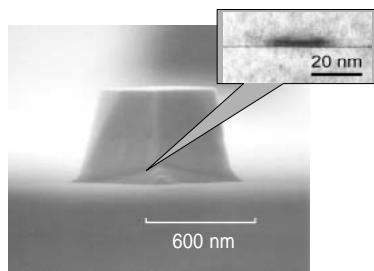


(a) 基板断面像

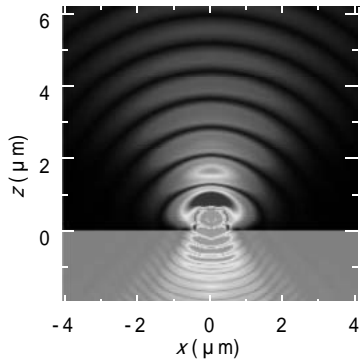


(b) 基板水平像

図-3 量子ドットの電子顕微鏡像
Fig.3-Electron-microscope images of quantum dots.



(a) 素子の電子顕微鏡像



(b) 光学構造のFDTDシミュレーション

図-4 単一光子発生素子
Fig.4-Single photon emitter.

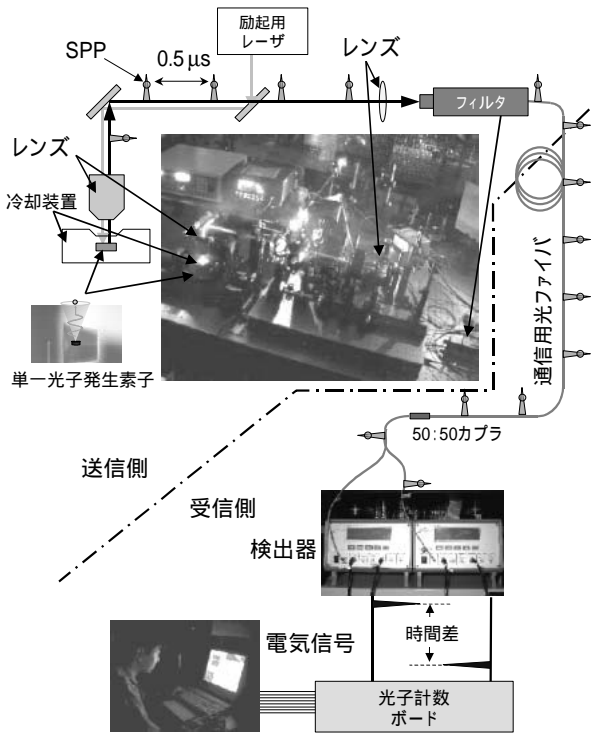
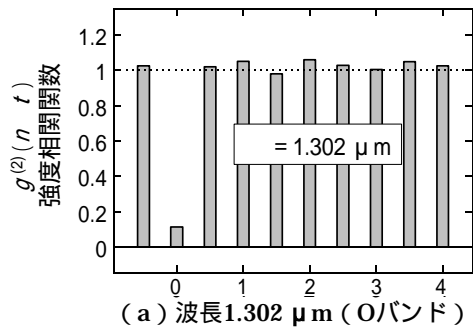
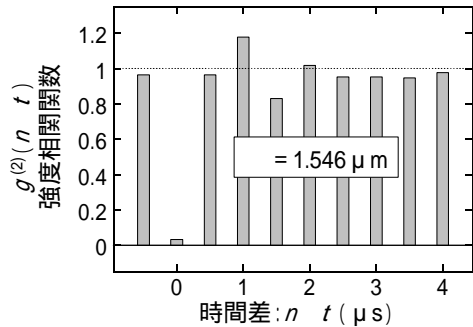


図-5 単一光子検証システム
Fig.5-Single photon measurement system.

く光子を取り出せるよう設計している { 図-4 (b) }



(a) 波長1.302 μm (Oバンド)



(b) 波長1.546 μm (Cバンド)

図-6 光子パルスの強度相関
Fig.6-Correlation function of photon pulses.

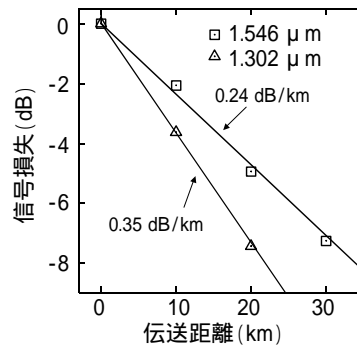


図-7 光ファイバによる単一光子パルス (SPP) 伝送実験
Fig.7-SPP transmission through optical fiber.

さらに単一光子のみを含むパルス进行评估するため、著者らは通信波長帯専用計測システムを構築した。このシステムでは量子ドットから取り出して光ファイバに導入した光パルスを二手に分けて、2台の検出器で測定する (図-5)。もし単一光子パルスならば、何回計測しても光子は分割できないため光子の同時測定はできないはずである。検証の結果 (図-6)、同時検出のカウン트가ほぼ0になっており、1.302 μm および1.546 μmで発光する量子ドットについて、単一光子パルス発生を確認することができた^{(9),(10)}

さらに量子暗号の予備実験として30 kmまでの伝送実験を行った。信号損失の距離依存性を図-7に示す。信号損失はファイバの透過特性のみに依存しており、より透過特性が良い1.546 μm で30 kmの伝送に成功している⁽¹⁰⁾。単純な結果であるが、単一光子パルスの長距離伝送も初めての試みである。

む す び

本稿では、光ファイバ伝送に適した波長帯の単一光子発生器と単一光子の発生・計測システムを開発、および単一光子パルスの長距離伝送の実験を紹介した。

今後、今回行った伝送実験よりもっと長距離の量子鍵伝送に用いるには、さらに発生素子の光学構造や光学系全体の改良が必要であり、現在この部分の開発に集中して取り組んでいる。2007年3月までに開発を終える予定であるが、高効率単一光子発生器技術は暗号のみならず量子情報処理の基本技術として広く利用されるポテンシャルを持っているので、なるべく早く実現したいと考えている。

本技術の研究開発の一部は、文部科学省の研究開発委託事業である「ITプログラム～世界最先端IT国家実現重点研究開発プロジェクト～」の中の1課題である「光・電子デバイス技術の開発プロジェクト」のもとで行われた。

参考文献

- (1) 総務省21世紀ネットワーク基盤技術研究推進会議資料。
http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/chousa/21-century/pdf/050325_2_s2_2.pdf
- (2) G. スティックス:「量子暗号」, 日経サイエンス, 2005年4月号, p.20-27.
- (3) 「量子情報科学の新時代」, 数理科学, 2003年11月号.
- (4) E. Knill et al.: A scheme for efficient quantum computation with linear optics. *nature*, Vol.409, p.46 (2001).
- (5) N. Lütkenhaus: Security against individual attacks for realistic quantum key distribution. *PRA*, Vol. 61, p.052304 (2000).
- (6) H.-K. Lo: Decoy State Quantum Key Distribution (QKD).
<http://www.newton.cam.ac.uk/webseminars/pg+ws/2004/qisw01/0826/lo/all.ppt>
- (7) K. Takemoto et al.: Observation of Exciton Transition in 1.3-1.55 μm Band from Single InAs/InP Quantum Dots in Mesa Structure. *JJAP*, Vol.43, No.3A, p.L349-L351 (2004).
- (8) Y. Sakuma et al.: Controlling emission wavelength from InAs self-assembled quantum dots on InP (001) during MOCVD. *Physica E*, Vol.26, p.81 (2005).
- (9) K. Takemoto et al.: Non-classical Photon Emission from a Single InAs/InP Quantum Dot in the 1.3- μm Optical-Fiber Band. *JJAP*, Vol.43, No.7B, p.L993-L995 (2004).
- (10) T. Miyazawa et al.: Single-Photon Generation in the 1.55- μm Optical-Fiber Band from an InAs/InP Quantum Dot. *JJAP*, Vol.44, No.20, p.L620-L622 (2005).