TUTORIAL
SERIES

量子光学と新技術(VIII・完)

講座

山本喜久 上田正仁

山本喜久：正員 NTT 基礎研究所
上田正仁： 同上

Quantum Optics and New Tecnology [VIII・finish]. By Yoshihisa YAMAMOTO, Member and Masahito UEDA, Nonmember (NTT Basic Reseach Laboratories, Musashino-shi 〒180).

応用・結論

前回までに、我々は量子力学の基礎といくつかの新原理について概観し、従来は量子限界とされていた壁や自然法則の一つとされていたものが、実際には克服できるものであることを知った。本稿では、これらの新原理のさまざまな応用分野を概観して、このシリーズの結論とする。

[I] で述べたように、現在の光通信技術は、既に通常の量子限界（ショット雑音限界）に到達している。情報の読み出し、分岐、線路損に伴う信号光のSN比劣化は、中継距離と伝送符号速度の積に限界を与えている。

[III] で述べたパラメトリック増幅（無雑音増幅）か、量子非破壊測定（無雑音測定）が実現できれば、この限界を克服し、中継距離と伝

送符号速度の積を飛躍的に増大することができる。しかし、これらのデバイスは、いずれも2次および3次の非線形効果に基づいており、実現のためには、大きな非線形性を持つ材料の開発が必須である。LSIにおける光配線は、大規模、高密度化、高速化が進むにつれて、ますます魅力的な技術として注目を浴びようになってきた。しかし、現実には、半導体レーザーの消費電力、サイズは共に、まだ非常に大きく、とてもLSIに集積化できるレベルにない。[IV] で述べたように、マイクロ共振器を用いて、自然放出を制御し、発振しきい値を数けたも低下させた半導体レーザーが実現できれば、消費電力、サイズ共非常に小さくなり、LSIへの集積化が可能になる。このマイクロ共振器半導体レーザーは、2次元の光情報処理の光源、スイッチ、光検出器としても活躍する可能性がある。

[I] で述べたように、光精密計測の分野でも、その技術は既に通常の量子限界に到達している。光メモリの読み出しのSN比を[II] で述べたスクイズド状態や光子数状態を用いて改善することが可能である。この場合、長距離の光通信とは異なり、光損は極めて小さいため、量子雑音を抑圧したこれらの光の応用は有効である。光顕微鏡の新しい技術として、偏光分光法を用いた生体神経ファイバ中の電気パルス伝搬の観測や電気光学効果による光サンプリングを用いた超高速電子回路中の電気パルス伝搬の観測が注目を浴びようになっている。しかしながら、前者の場合、生体系の変化が極微小であ

予 定 目 次

- [I] はじめに
量子力学の基礎 (I) - 不確定性原理 -
(6月号)
- [II] スクイズド状態と光子対 (7月号)
- [III] 量子非破壊測定 (8月号)
- [IV] 共振器量子電気力学 (9月号)
- [V] トンネル電流の量子化 (10月号)
- [VI] 量子力学の基礎 (II) - 重ね合せの原理
と観測問題 - (12月号)
- [VII] 量子力学と情報 (1月号)
- [VIII・完] 応用・結論 (2月号)

るにもかかわらず、強い光を使えないため、検出時に十分な SN 比が確保できないことが問題である。後者の場合、(漏れ)電場の変化が極微小であるにもかかわらず、超高速の現象であるので、観測時間当りの光子数を大きくできず、やはり SN 比の確保が問題となる。零点スクイズ状態を用いた偏光干渉計を構成すれば、SN 比を改善することができる。また、光干渉計を用いた重力波検出や光偏向回転を用いた axion, graviton などの low mass particle の検出など、基礎科学実験の分野でも、レーザ出力パワーと SN 比の限界が問題となっている。ここにおいても、零点スクイズ状態の応用による SN 比の改善が検討されている。

コンピュータの論理素子、メモリ素子における発熱は、集積度に限界を与え、集積度は配線遅延および帯域制限を通して演算速度に限界を与え、演算速度は時間とエネルギーの間の取り引き関係を通して、エネルギー消費量(熱発生)に限界を与える。この悪い循環から抜け出す一つの方法は、論理素子やメモリ素子に使われている巨視的な(多数の原子や分子で構成される)トランジスタを、微視的な系(電子や原子一つ)に置き換えることである。[V]で述べたクーロン・ブロケードの原理を利用した単一電子トランジスタなどは、それを実現しうる例である。また、単一電子や単一原子の持つ情報の処理には、量子雑音を抑圧した光子数状態やスクイズ状態を用いたコヒーレント相互作用が有効である。これにより、原子の持つ情報にじょう乱を与えず、またエネルギー散逸(発熱)を伴わない情報転送やスイッチができる。

1. 量子光通信

情報の分岐、線路損に伴う信号光の SN 比の劣化は、[I]で述べたように、損失過程で信号光に混入する真空場揺らぎのためで、これは量子力学的揺動散逸定理の要請である。これを克服する唯一の方法は、信号光をパラメトリック増幅器などにより無雑音増幅して、SN 比を保存したまま、その量子雑音を真空場揺らぎよ

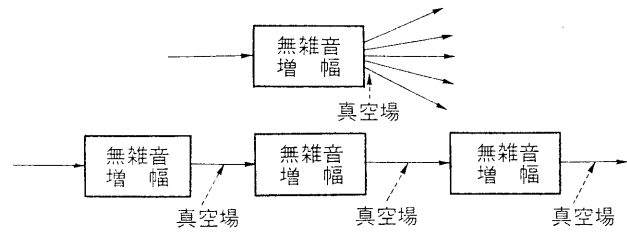


図1 無雑音増幅による信号光の SN 比劣化の抑圧

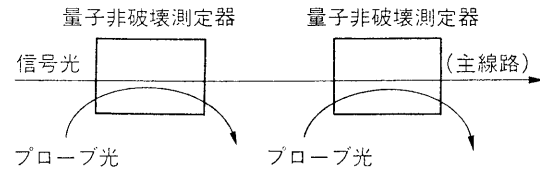


図2 量子非破壊測定による信号光の SN 比劣化の抑圧

り大きくすることである。こうしておけば、損失により混入する真空場揺らぎを、信号光自身のもつ量子雑音に比べて無視することができ、SN 比の劣化は抑えられる。この原理は、数学的には、[III]の式(26)で説明される。この様子を図1に示した。スクイズ状態の無雑音増幅は、[III]で示したように、縮退パラメトリック増幅器を用いて、原理的には、実現できる。しかし、大きな増幅利得を確保するためにはより大きな2次の非線形性を持つ材料が必要であり、また増幅する位相成分を決定するための光位相同期ループ(PLL)を必要とするなど、実現は容易ではない。光子数状態の無雑音増幅についてもいくつかの提案例はある^{(1),(2)}が、まだ実現性のあるものとはいえない。効率のよい無雑音増幅を可能にする新原理の提案が待たれる。

情報の読出しだけが目的で線路損が無視できる場合には、量子非破壊測定法を用いて、信号光の SN 比を劣化させずにこれを行うことができる。この様子を図2に示す。光子数の量子非破壊測定は[III]に述べた光カー媒質中での信号光とプローブ光の相互位相変調を用いて実現できるが、やはり、大きな3次の非線形性を持つ材料が必要である。光ファイバ中のソリトンの衝突や半導体中のエキシトン・SITソリトンの衝突を用いてこれを実現することが提案されている^{(3),(4)}。また、非線形ガラスで作られたマ

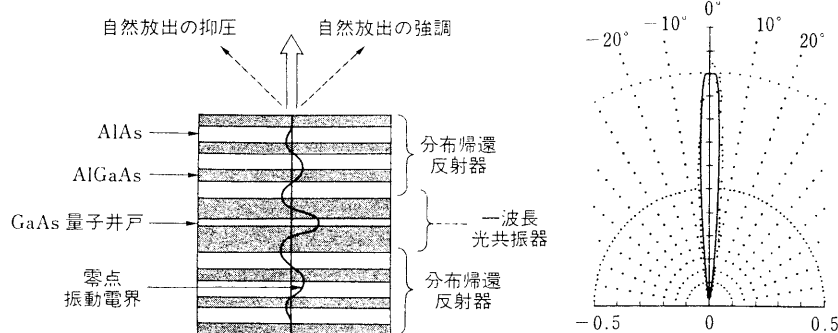


図3 マイクロ共振器半導体レーザと、垂直方向に集中した自然放出パターン

マイクロ球内の表面波モードを使うことなどが研究されている⁽⁵⁾。

情報の分岐や線路損が問題とならない近距離の光通信，例えば，LSIの光配線などにおいては，スクイズド状態や光子数状態の低雑音性をそのまま利用することができる。図3に示した，マイクロ共振器半導体レーザは，このような目的に適したデバイスである。その理由は，単に，面発光型レーザであるため，集積化しやすいというだけではない。1次元の周期構造による分布帰還反射器2枚によって，低屈折率の半波長もしくは高屈折率の一波長キャビティが挟まれ，その中央に量子井戸が形成されている。狭いエキシトン発光の自然放出は，縦方向に伝搬する唯一の共振器モードへ結合する⁽⁶⁾。その理由は，垂直に入射，伝搬する共振器モードの真空場揺らぎは，量子井戸の位置で強調されるのに対し，他の方向から入射する真空場揺らぎは，分布帰還反射器で反射され，キャビティ内に入り込めないためである。[IV]で述べたように，自然放出は，真空場揺らぎによる一種の誘導放出であるから，全自然放出光のうち，レーザモードに結合する割合は1に近い値となる。通常の半導体レーザでは，この自然放出光係数は 10^{-5} のオーダーである。発振しきい値電流は，光子寿命を一定(1 ps)とすると，この自然放出光係数で一義的に決められ，10 mAのオーダーである。一方，

自然放出光係数を1に近づけたマイクロ共振器半導体レーザでは，発振しきい値電流は，これより，5けた小さい100 nAのオーダーとなる。これは消費電力(熱発生)が5けた改善されることを意味する。駆動電流が100 nAのオーダーのとき，パルス幅10 psにふく

まれる平均光子数は約10個である。このように少ない光子数で，情報伝送が可能であろうか？マイクロ共振器半導体レーザの特徴の一つは，自然放出光雑音を抑圧したことにより，その放出光が発振しきい値付近でも発振しきい値以下でも振幅スクイズド状態になっていることである⁽⁶⁾。これにより，微弱光でも，十分なSN比を確保することができる。

2. 量子光計測

図4に，生体の神経ファイバを伝搬する電気パルスが引き起す複屈折性を偏光干渉計を用いて観測する系を示す⁽⁷⁾。P1は，偏向ビームスリットであり， y 偏波のコヒーレント光と x 偏波の真空場揺らぎ(もしくは零点スクイズド光)を合波する。光が神経ファイバを通過するとき，たまたま電気パルスが同じ地点を伝搬していたとすると，偏向方向が極わずかながら回転する。 $\frac{\lambda}{2}$ は半波長板であり，偏向方向を 45° 回転し，偏向ビームスプリットP2により，コ

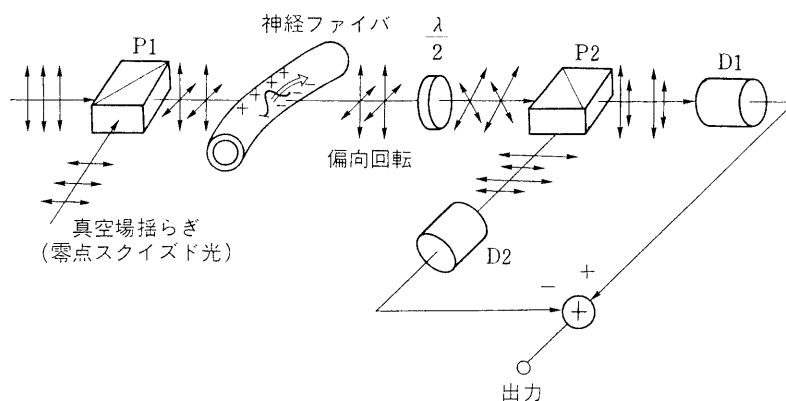


図4 偏光干渉計を用いた生体神経ファイバ中の電気パルス伝搬の観測

ヒーレント光も真空場揺らぎも、ほぼ半分ずつに分岐されるようにする。二つの検出器 D1, D2 の出力の差分が、神経ファイバ中での偏向回転に比例する。この場合、コヒーレント光自身の振幅雑音はバランス検出器で抑圧できる。検出信号に最終的に残存するショット雑音の起源は、 x 偏波の真空場揺らぎである。もし、このポートに零点スクイズド光を入射すれば、[II] の式 (5) で示したように、SN 比はパルス当りの光子数の 2 乗に比例して改善される。この偏光干渉計を、走査型の光顕微鏡に組み込めば、生体情報処理機構の高精度、非破壊観測が可能となろう。また、透過型や反射型の顕微鏡においても、同様に、検出時のショット雑音の起源となる真空場揺らぎが混入するポートに、零点スクイズド光を入射すれば、同じく SN 比が改善される。

図 5 に、超高速電子回路を伝搬する電気パルスを、観測する系を示す。空気中に漏れ出した電場による電気光学結晶の複屈折性を、同じく偏光干渉計を用いて測定するものである⁽⁸⁾。この場合も、やはり零点スクイズド光を用いて、SN 比を改善することができる。

図 6 には、重力波検出用の光干渉計が示されている。垂直に交わる二つのアームは、長さが約 100 km、その終端には重さ 100 kg から 1 t のアルミニウム・バーに取り付けられた 2 枚の鏡 M₁, M₂ がある。重力波の飛来により、2 枚

の鏡は周期 1 kHz 程度で 10^{-16} cm 程度 (1 原子層の約 1 億分の 1 程度!) 振動する。その結果、二つのアーム間に極わずかの光学的位相差が生じ、出力光強度が同じ周期で振動する。これを検出しようというものである。代表的な数値を用いて計算された、重力波を検出するために必要な、レーザ光パワーは約 10 kW (cw) である⁽⁹⁾。この場合の SN 比を決めている検出時のショット雑音の起源も、また、開いたポートから混入する真空場揺らぎである。そこで、零点スクイズド光を、このポートに入射させることにより、同じく SN 比を改善することができ、必要なレーザ光パワーを減少させることができる。図 6 に示したものは、通常の光干渉計であるが、最近、暗い干渉縞^{しま}を用いたものが提案された。レーザ光はすべて光干渉計の中で吸収、散乱されるように構成されている。このようにするメリットは、検出器に直接、高出力レーザ光が照射されなくて済むからである。この暗い干渉縞を用いた光干渉計においても、零点スクイズド光を用いて SN 比が改善できることがわかっている⁽¹⁰⁾。

光ファイバジャイロの SN 比も、重力波検出用光干渉計と同様、開いたポートより入射する真空場揺らぎにより決められている。従って、零点スクイズド光を用いて SN 比を改善することができる⁽¹¹⁾。一方、レーザジャイロの SN 比は、レーザ自身の自然放出光雑音によるシャ

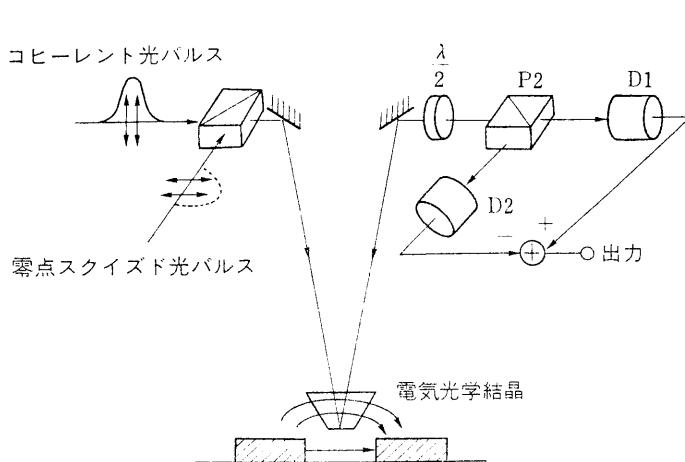


図 5 電気光学サンプリングによる超高速電子回路中の電気パルス伝搬の観測

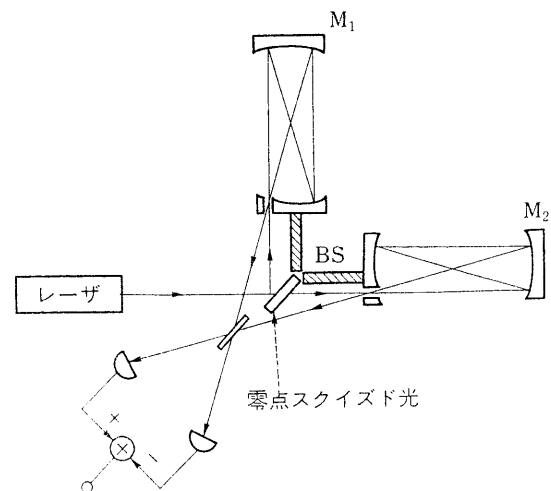


図 6 零点スクイズド光を用いた重力波検出用干渉計

ロータウンズ線幅で決められている。この限界を克服するものとして、量子相関を持った自然放出光を利用したレーザ⁽¹²⁾や4光波パラメトリック発振器⁽¹³⁾などが提案されている。

3. 量子コンピューティング

[V] で既に述べたように、極微小トンネル接合におけるクーロン・ブロードの原理を用いて、単位電荷 e 以下の電荷量で制御されるトランジスタが理論的に提案され⁽¹³⁾、実験により実証された⁽¹⁴⁾。また、クーロン・ブロードの原理を、マイクロ共振器による自然放出の制御と組み合わせて、光子一つ一つを制御して発生することも提案されている⁽¹⁵⁾。

図7には原子の量子状態を、光子数状態の光パルスを用いてスイッチする原理が示されている⁽¹⁶⁾。例えば、二つの半導体量子箱が結合して、重い正孔の二つの基底準位はその重い質量のために各々の量子箱に局在化しているが、伝導電子の基底準位は、その軽い質量のために二つの量子箱にまたがって波動関数が広がっているとす。二つの正孔の基底準位は相互に結合せず安定であるから、これを二つの信号状態に割り当てるとする。すなわち、結合した二つの量子箱は、人工的な3準位原子とみなせる。今、この信号状態をスイッチしたい時には、電子-正

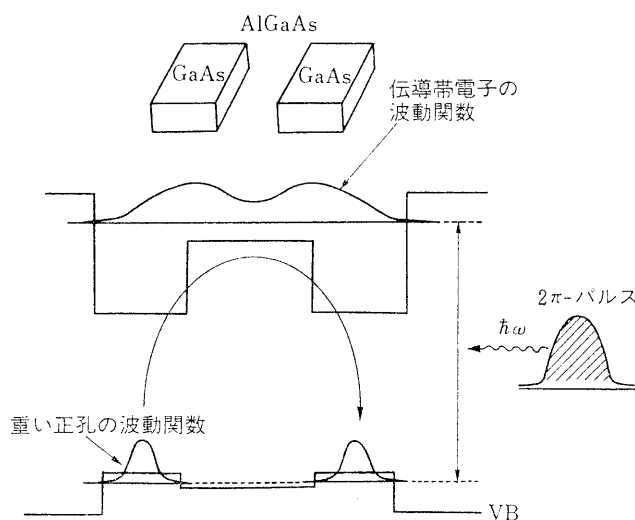


図7 二つの量子箱にトラップされた電子状態を 2π -パルスを用いてスイッチする

孔の準位間のエネルギー差に同調した、パルス面積 2π 、sech 形の光子数状態の光パルス照射すれば、エネルギーの消費なく、信号状態を誤りなくスイッチできる。このような、人工的な3準位原子を二つ、同時にスイッチすることも、パルス面積 π の光パルスを用いれば実現できる。このようにして、人工的な原子と光子数状態の光を用いて、エネルギー散逸（発熱）を伴わないメモリやフリップフロップが構成される。

情報処理を原子、電子一つのレベルで実現し、情報の読出し、伝送を光子一つを用いて実現する単一電子エレクトロニクス、単一光子フォトリニクスは、将来の魅力的な研究目標である。

4. 結 論

8回にわたり、量子力学の基礎と量子光学の最近の話題、新しい技術への発展の可能性を概観してきた。ここ数年、急速に発展してきたこの研究分野の主眼は、新原理の発見とその実現手段の探索であった。スクイズド状態とよばれる新しい光、量子非破壊測定とよばれる新しい測定法、自然法則の一つとされていた自然放出の抑圧、全くランダムとされていた電子のトンネル現象の制御、などいずれも現象の正しい解釈と実験的確認に研究の主力が置かれてきた。その意味で、今回の応用面に関する解説は全く未完成なものである。多分、これらの新原理の最も重要な応用分野は、まだ我々の間に認識されていないと思われる。

また、量子光学の新しい技術を用いて、量子力学の諸問題、パラドクスを解明する試みは、緒についたばかりである。このシリーズでは述べることができなかったが、数年の後、この分野の解説が必要になるほどこの方面の研究も進展することを期待してやまない。 (完)

文 献

- (1) H. P. Yuen : Phys. Rev. Lett., 56, 2176 (1986).
- (2) Y. Yamamoto, et al. : Progress in Optics (North-Holland, 1990).
- (3) H. A. Haus, K. Watanabe and Y. Yamamoto : J. Opt. Soc. Am., B6, 1138 (1989).

- (4) K. Watanabe, H. Nakano, A. Honold and Y. Yamamoto : Phys. Rev. Lett., 62, 2257 (1989).
- (5) V. B. Braginski, M. L. Gorodesky and V. S. Ilchenko : Phys. Lett., A137, 393 (1989).
- (6) Y. Yamamoto, S. Machida, K. Igeta and Y. Hori-koshi : 6th Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics (June 1989). to be published from Plenum, 1990.
- (7) L. B. Cohen, R. D. Keynes and D. Landowne : J. Physiol., 224, 727 (1972); 224, 701 (1972).
- (8) M. C. Nuss, et al. : CLEO '89, J11 (1989, Baltimore).
- (9) C. M. Caves. : Phys. Rev., D23, 1693 (1981).
- (10) R. E. Slusher : unpublished work.
- (11) T. A. Dorschner, et al. : IEEE J. Quantum Elec-tron., QE-16, 1376 (1980).
- (12) M. O. Scully and J. G. Banacloche : Phys. Rev., A34, 4043 (1986).
- (13) K. K. Likharev : IEEE Trans. Mag., MAG-23, 1142 (1987).
- (14) T. A. Fulton and G. J. Dolan : Phys. Rev. Lett., 59, 109 (1987).
- (15) Y. Yamamoto, et al. : Proc. of 11th Int. Conf. Atomic Physics, ed. by S. Haroche (World Scien-tific, 1989).
- (16) K. Obermayer : G. Mahler and H. Haken, Phys. Rev. Lett., 58, 1792 (1987).



山本 喜久 (正員)

昭48 東工大・工・電気卒。昭53 東大大学院博士課程了。同年日本電信電話公社入社。以来、コヒーレント光通信、レーザー増幅器、レーザーの量子雑音、量子光学の研究に従事。現在、NTT基礎研究所情報科学研究部山本グループリーダー。工博。昭56年度学術奨励賞、昭60年度業績賞受賞。著書「Semiconductors and Semimetals」など。



上田 正仁

昭61 東大・理・物理卒。昭63 同大大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。以来、微小接合素子の量子論の研究、量子光通信の研究に従事。現在、NTT基礎研究所情報科学研究部山本グループに所属。

