レーザー解説

フォトン走査トンネル顕微鏡

大津元一*・蔣曙東*・大澤日佐雄**

(1991年8月6日 受理)

Photon Scanning Tunneling Microscope

Motoichi OHTSU*, Shudong JIANG* and Hisao OHSAWA**

(Received August 6, 1991)

The authors' studies on photon scanning tunneling microscope (PSTM) are reviewed. Normal and lateral resolutions achieved by a transmission-type PSTM are estimated as high as 2-nm and 5-nm, respectively. To improve the performance of the system, several methods are proposed, e.g., a novel reflection-resonance-type PSTM is advantageous to improve the resolution. Advanced application systems are also proposed, and especially, a possibility of using the PSTM system as a single-atom-level crystal growth is discussed.

Key Words: Photon, Microscope, STM, Semiconductor laser, Crystal growth.

1. まえがき

光による新しいセンシング、プロセッシング、を行なうためには光の持つ特性を再考する必要がある。光を波と見なしたとき、その特性は周波数(光パルス幅)、パワー、偏光、によって記述され、現在までにレーザーを用いてこれらの性能は著しく向上している¹⁾。しかし、まだ取り残されているのは光の空間的局在および、光をフォトンと見なしたときのエネルギーの最少単位 $h\nu$ を活用する方法である。

我々は数年前に以上のような考察をもとにフォトン走査トンネル顕微鏡(PSTM: Photon Scanning Tunneling Microscope)の研究を開始

した。まず、光の波長より小さい寸法の空間に光を局在させることにより回折限界を越える超解像顕微鏡が実現する。さらに、この顕微鏡の視野内の試料は少数個の原子からなり得るので、 $h\nu$ の値が小さくても(特に共鳴相互作用を利用すれば)、これらの原子に与える摂動エネルギーが大きくなり得る。

したがって、摂動エネルギーが小さい場合には、PSTMを非接触・非破壊で超解像形状測定可能な顕微鏡として、さらに摂動エネルギーが大きい場合には極微プロセッシングのための加工機として使える。特に、後者に関しては単原子レベルの結晶成長などの可能性がある。

PSTMでは近視野での光学的測定技術を使う

* 東京工業大学 総合理工学研究科 (〒227 横浜市緑区長津田4259)

** 株式会社ニコン開発本部研究所 (〒140 品川区西大井1-6-3)

* Graduate School at Nagatsuta, Tokyo Institute of Technology (4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227)

** Research Laboratory, NIKON Corp. (1-6-3 Nishi-Ohi, Sinagawa-ku, Tokyo 140)

Fig. 1 Transmission-type photon scanning tunneling microscope (T-PTSM). (a) The principle of operation. (b) Block diagram of the system.

ので近視野顕微鏡 (NFM: Near Field Microscope)²⁻⁸⁾とも呼ばれる。NFMはすでに長い歴史をもつが、それらは装置性能、実用性、プロセッシングへの応用可能性、などの点で未だ発展途上である。この点を改善したPSTMはNFMとは著しい差を有するといえる。しかし現在のところ、PSTMとNFMとの区別、分類、さらにそれらの名称についての厳密な定義が必ずしも十分ではなく、今後整理されるべきである。

以下ではPSTMに関する我々の研究を中心に概説するが、その内容の一部については、すでに公表されている著者らの解説記事⁹⁻¹¹⁾と重複することを予めお断りさせて頂きたい。

2. PSTMの原理

Fig. 1 (a)にPSTMの基本原理を示す。顕微鏡としての試料の面内方向($x-y$ 軸方向)分解能を向上させるためには光の波長 λ より小さい直径 a をもつ開口をプローブとして使う。一方、厚み方向(z 軸方向)の分解能を向上させるためには全反射時に発生するエバネッセント光を利用する。エバネッセント光は z 軸方向に指数関数的に減衰するので $z \ll \lambda$ なる近視野での測定が必要である。近視野では回折が無視でき、上記開口により超解像が実現する。すなわち、こ

の開口によって光の空間的局在を実現して面内形状に関する情報を抽出し、開口を通り抜けた光のパワー測定によってその情報を検出する。これは、ファブリ・ペロー共振器などの光周波数復調器の透過光パワーを測定すれば光周波数に関する情報を抽出できることと同等である。

光をフォトンと見なして以上の原理を考えると、 $a \ll \lambda$ なる開口を通して光をピックアップすることはフォトンの運動量測定誤差 Δp を大きくし($\Delta p/p = h/a$; h はプランクの定数)、位置測定誤差を Δx を減少させることに対応する($\Delta x \geq a/2\pi$)。一方、エバネッセント光の検出は、開口を試料に近づけることにより試料面におけるフォトンのトンネリング障壁の高さを減少させること、すなわち、開口によってエバネッセント光の場を破壊することにより検出していることに対応する。

我々の用いているプローブは先端を研磨した光ファイバーである。これをFig. 1 (b)に示すように $x-y$ 軸方向に走査しながら、光パワーを測定し、計算機により適当な画像処理を施した後、CRTディスプレイ上に表示する。これらの走査、表示システムは従来のSTMと同様である。

3. PSTMのシステムと実験結果

まず, Fig. 1 (b) に示すような透過形PSTM (T-PSTM) について記す。T-PSTMはレーザー光のパワー密度が高いことを利用したものであり, 試料表面形状の測定はエバネッセント光のパワーを測定することにより行われる。T-PSTMを光通信システムと対応させると強度変調-直接検波方式に対応する。したがって, システム構成は簡単かつ小形(本体体積 $1,000\text{cm}^3$ 以内)であるが, 低パワーのエバネッセント光を測定するので, 従来は感度が低く, 分解能も制限されていた。しかし, 我々はAlGaAsレーザーに出力光が一定になるような自動制御を施し, かつ単一モード光ファイバーをプローブとして用いることにより検出パワーを増大することができた。T-PSTMを用いると試料表面の局所的な光化学反応を強制的に誘起させて, その結果を測定すること, さらに, レーザー波長を掃引すれば局所的な分光分析, 組成分析, などが期待できる。Fig. 1 (b) ではレーザーパワーの直接変調・位相敏感検波方式が示されているが, この他に, プローブの z 軸方向走査用のピエゾ・アクチュエータを変調し, 位相敏感検波する方式, さらに, フォトンカウンティング法など, 種々の方法が可能である。半導体レーザーの直接変調帯域は1 GHz以上に及ぶので他のSTMシステムに比べ, 高速測定可能な利点を有する。

高い面内分解能を得るために微小開口を持つ光ファイバー・プローブを使っている。このファイバー先端の微小開口の製作方法は従来いくつか提案されているが(ラテックス球による方法²⁾, 石英棒の先端を尖らす方法³⁾, ピペット法⁵⁾など), 未だ加工精度と再現性が低い。一方我々の製作方法は次のようなものである。単一モード光ファイバーのコア先端を弗酸を用いた選択エッチングによって尖らせる。次にクロム及び金の薄膜を蒸着し, さらにプラズマエッチングあるいはSTMプローブの先端との放電によりコア先端の一部を露出させ, 微小開

Fig. 2 SEM picture of an optical fiber with a shaped core¹⁰⁾. (a) Side view. (b) Bird's-eye view.

口とする。Fig. 2 には先端を尖らせ, 金属薄膜を蒸着した後のSEM写真を示す¹⁰⁾。ファイバー・コア先端部の尖り角度 (Cone angle) は約100度, また曲率半径は約80nm以内と推定される。金属薄膜の蒸着, さらに開口形成についてはまだ必ずしも十分な再現性が得られていないが, 数10nm以下の開口径が可能であることも指摘されている⁴⁾。さらに, ファイバー先端をより鋭く尖らせれば電界蒸発法も可能である¹²⁾。選択エッチングによるファイバー・コアの先鋭化はファイバーの比屈折率差 δ に依存する。Fig. 2 でも用いた波長 $0.8\mu\text{m}$ レーザー用の通常の単一モードファイバーでは $\delta=0.36\%$ であるが, 非線形光学用ファイバーでは δ の値は2.3%に達する。これを用い, Fig. 2 よりも

Fig. 3 Measured result of the relation between the sample-probe separation and picked-up evanescent power of the T-PSTM¹⁶⁾.

Fig. 4 Measured profile of the edge of the SiO₂-thin film of 9-nm thickness¹⁶⁾.

さらに鋭い先端が最近実現し、尖り角度は約25度になっていることが確認されている¹³⁾。

Fig. 3 にプローブと試料マウント用プリズム面との間隔と、エバネッセント光パワーとの関係の測定結果を示す。試料入射時のレーザーパワーは数mWである。測定されたエバネッセント光パワーは数10pWである。両パワー値の比は従来のNFMシステム²⁻⁷⁾に比べて100倍以上の高い値になっている。さらに、開口周囲の金属蒸着膜からの表面プラズモンを使えば、さらに高い光パワーが得られることが確認されている^{14,15)}。この場合、面内分解能が低下する恐

れがあるが、測定感度が向上するので、さらに小さな開口を使うことが可能となり、むしろ分解能が向上すると期待されている。Fig. 1 (b) のプリズムの上面の半分に蒸着した厚さ9 nm のSiO₂ 薄膜の端部の形状測定を行った結果をFig. 4 に示す¹⁶⁾。Fig. 5 (a) には深さ約80nm, 直径約300nmのピットを有するMoth-eye 光ディスク表面のSEM写真を示す¹⁶⁾。この光ディスク表面には周期1.4 μmの案内溝が設けられている。さらに、厚さ約12nmのプラチナ薄膜が蒸着されているが、ほぼ透明である。Fig. 5 (b)~(c)はT-PSTMでの測定結果である¹⁶⁾。倍率を上げて行くと、図(b)では上記の案内溝が見られ、(c),(d)ではピットが見られる。Fig. 6 は直径80nmのラテックス球をプリズム表面に固定した試料の測定結果である¹⁶⁾。この場合ラテックス球は互いに凝集し、真球から歪んだ状態になっているが、多数のラテックス球が明瞭に観測される。Fig. 7 はバクテリオファージT₄の像である¹³⁾。従来はSEM観測により、この形状は頭部直径が65~95nm, 尾部は長さ約95nmの細い線状であることがわかっていたが、今回PSTMにより初めて染色せずに観測することに成功している。

以上の一連の測定結果において、測定時の信号S/N値より、厚み方向分解能2 nm以内、面内分解能5 nm以内、と推定されている。ただし、これらの値は位相敏感検波方式における測定時定数 τ が1 ms~100msの場合の結果である。半導体レーザーが高速変調可能であることをより積極的に利用すればこの τ の値はさらに小さくなり、高速測定の特長を生かすことができる。システムの雑音の基本要因は光検出時のショット雑音、すなわち白色雑音なので、S/N値は $\tau^{-1/2}$ に比例する。従って、 τ を大きくすれば、さらに高い分解能が期待される。

4. 性能向上のための課題

T-PSTMは簡単なシステムであるが、微小な光パワーを測定するので、感度が低く、従って分解能も制限される。この問題を解決するため

Fig. 5 Measured profile of the Moth-eye-type optical disc surface, on which pits of 80-nm depth and 300-nm diameter are fabricated¹⁶⁾. (a) SEM picture. (b)-(d) Measured profile by the T-PSTM by increasing the magnification power.

に我々は反射共振形PSTM(RR-PSTM)を提案している^{15,17)}。Fig. 8 (a)にRR-PSTMの基本構成を示す。レーザー光を導波路形共振器に入射させ、レーザー周波数が共振器の共振周波数に一致するようにレーザーを制御しておく。共振器の2つの端面のうち、試料に面した端面には微小開口を設け、これをプローブとして用いる。共振器を試料に接近させると、開口からのエバネッセント光が近接試料表面によって摂動を受ける。その結果、共振器端面の複素反射率が試料の表面形状によって変化し、共振周波数がシフトする。これにより上記のレーザーの周波数もシフトするので、これを基準レーザーあるいは他の共振器とのヘテロダイン信号周波数シフト測定により求める。すなわち、RR-PSTMはレーザーの高コヒーレンス特性を

活用したものであり、試料形状は周波数シフトの測定により求められる。Fig. 8 (b)に(a)の変形として、半導体レーザー自身をプローブとして用いるシステムの原理図を示す。すなわち光増幅機能を有するプローブであり、(a)の半導体レーザーと共振器の役割を一つの半導体レーザーにより実現させる方法の一つとして我々が提案しているものである^{15,17)}。

周波数測定はすべての物理量測定のうちで最高精度になり得ることは衆知の通りであるので、これはT-PSTMのもつ感度に関する問題点を解決するものである。すなわち、これは周波数変調-ヘテロダイン検波方式を採用したコヒーレント光通信システムに対応する。RR-PSTMにより、さらに高い分解能をもつセンシングが可能と考えられる。ショット雑音限

Fig. 6 Measured profile of the latex particles with 80-nm diameters which were densely fixed on a glass substrate¹⁶⁾. (a) Schematic explanation. (b) Measured profile.

Fig. 7 Measured profile of the bacteriophage T_4 ¹³⁾.

界での分解能はT-PSTMよりも1桁以上よいことが推定されているが¹⁷⁾、これを実現するため

Fig. 8 Reflection-resonance-type PSTM^{15,17)}. (a) The system employing the heterodyne-detection with a standard laser. (b) The system using a semiconductor laser as a probe.

には約10Hzの光周波数シフトを検出しなければならない。従って、RR-PSTMを実現するための要素技術として高フィネスの短共振器や、高コヒーレンス半導体レーザー、光位相同期ループが必要である。高コヒーレンス半導体レーザーとしてはすでに線幅7 Hzが実現しており¹⁸⁾、ヘテロダイン形光位相同期ループの周波数安定度も 1×10^{-18} を実現している¹⁹⁾。さらに 1×10^{-16} のレーザー周波数安定度も実現している²⁰⁾。これらの技術を利用すれば上記の光周波数シフト値は十分検出可能である。

マイクロ波を用いた予備的なシミュレーション実験により、すでに厚み方向および面内方向

分解能として各々 $5 \times 10^{-3} \lambda$, $5 \times 10^{-2} \lambda$, が得られている¹⁷⁾。これらの値はT-PSTMに比べ、すでに優れており、今後、測定条件の改良により一層の分解能向上が期待される。

この他、PSTMの性能向上には次のような課題の克服が必要と考えられる。

(1) 近視野波動光学理論の確立：近視野領域でのマクスウェル方程式を適切な境界条件で解く近視野波動光学理論はまだ十分発達していない。原子大きさ程度の分解能が実現すると、光に対して物体表面とは何か、境界条件とは何か、などについての詳細な検討を行い、感度、分解能の相互関係を明らかにする必要がある。

(2) 試料の固定法の確立：特にラテックス球のような微小粒子やバクテリオファージなど、有機、生体試料をガラス面上に固定する際、凝集を防ぐための再現性の高い技術の確立が重要となる。

(3) 要素作成技術の確立：再現性のある微小開口作成法として、エレクトロン・エッチング法²¹⁾、電界蒸発法¹²⁾、などの技術を利用するとともにファイバー先端をより先鋭化する加工法の開発が必要である。これには、3節で述べたように比屈折率差の大きなファイバーなど、PSTM用の特殊ファイバーの開発が望まれる。また、半導体プレーナー加工技術を利用して平板上に微小開口を作り、プローブとして用いることも可能である。RR-PSTMの場合、高フィネスの短共振器が必要であるが、現在までに単一モードファイバーを用いて、誘電体多層膜蒸着により、共振器長2 mm以下、フィネス200以上の値が報告されている²²⁾。また、スーパー共振器ではフィネス 1×10^6 も実現している²³⁾。今後、さらにプレーナー技術(イオン交換、イオン注入)による高安定、低損失導波路形短共振器の実現が期待できる。Fig. 8の共振器の代わりに半導体レーザーの端面に微小開口を作ったものを使えば、これは光増幅機能も備えたプローブとなる^{15,17)}。

(4) 新しい測定方式の探索：

(a) 開口合成法の使用可能性の探求；すでに製作されているマルチコア・ファイバー²⁴⁾、またはプレーナー・プロセス技術を用い、近接した複数のプローブをモノリシックに製作し、マルチ・プローブとして用いる。これにより得られた試料形状測定結果に含まれる各プローブ間の相関を抽出することにより、単一プローブよりも高い分解能が期待される。同様の可能性は従来のSTMにも得られることがわかっている。この場合、モアレ・パターンに類似の画像が得られるので、計算機処理により分解能はさらに向上し得る。光の特徴について従来の常識的な知識から推定するとPSTMの分解能はSTMのそれに匹敵するほど高くなり得ないのではないかとこの憶測もあるが、光のもつ特徴を利用することにより原子レベルの分解能を得ることも不可能ではないと考えられる。

(b) 量子雑音限界の打破；PSTMはヘテロダイン検波法などを採用できるので、ショット雑音限界(量子雑音限界)が比較的容易に達成可能である。この意味でPSTMは量子効果の現れやすいシステム、すなわち quantum microscope (量子顕微鏡)、ということができよう。分解能および感度限界は当面この量子雑音により制限されるが、光子数スクイズド状態、位相スクイズド状態²⁵⁾、の光を使用すれば、それぞれT-PSTM, RR-PSTMはこの雑音限界を越える super-quantum microscope になり得る。

5. 可能な応用範囲

現在のPSTMの分解能は光学顕微鏡と電子顕微鏡(SEM, STMなど)との中間の値をとり、かつ視野が比較的広いので非接触・非破壊・実時間の形状センサーとして有用である。前節最後にも指摘したようにこのセンサーとしての分解能はさらに向上し得る。また、後述のように加工機としても機能し得るので、以下のような広い分野での応用可能性を有する。

(1) 有機エレクトロニクス分野：有機超薄膜などの表面形状の広視野観測、かつ光源波長を掃引して各部分での局所的な構造解析。

(2) 生命理工学分野：生体細胞膜，DNA，特に種々のヴィールス²⁶⁾などの形状の非破壊動特性測定。複数個のプローブを用いた生体細胞膜中の刺激の伝搬特性の評価，ゲート機構の解明。細胞プロセッシング(例えば，従来使われていたレーザー顕微鏡²⁷⁾の代わりにPSTM用のプローブを使い，細胞の特定の位置にレーザー光を照射して細胞に穴を開け，細胞へのDNAの打ち込み精度を向上させる)。DNAよりも小さな寸法の試料を操作するピンセットとしての利用。

(3) 光メモリー，記録：相転移形光磁気ディスクの評価。この場合は屈折率のみ変化するので，原子間力顕微鏡(AFM：Atomic Force Microscope)，STMでは測定不可能であり，PSTMが不可欠といえる。短波長レーザーを使ったPSTMによりフォトクロミック材料表面へのサブミクロン刻線。

(4) 半導体工学分野：結晶表面に吸着した原子，分子層の評価，単原子層結晶成長制御，超高密度集積回路(ULSI)の評価およびトリミング，局所的レーザーアニール，結晶表面上の原子中のsp混成軌道の斜め方向からの光の打ち込みによる光電子放出。極微半導体の量子サイズ効果の評価。

(5) 精密機械工学分野：マイクロマシンの駆動，制御(以下に述べる(4)の原理と同様，光の放射圧を利用)。

ここで，(4)に関連して，我々が提案している単一原子操作および結晶成長の手法を以下に概説する^{28,29)}。フォトンの最小エネルギー $h\nu$ が小さくとも，操作対象のエネルギーが小さければ，光照射による摂動エネルギーは相対的に十分大きく，PSTMは超微細加工機として働く。すでにSTMをキセノンの単一原子の操作に使う試みが報告されているが³⁰⁾，PSTMでは適当な波長の光源を選べば半導体産業において重要な原子にも適用可能な加工機となり得る。これは三段階からなる。まず，第一段階としては真空中で気体原子集団にレーザー光を照射し，レーザー冷却および光糖蜜の手法により原子の

熱運動の等価原子温度を低下させる³¹⁾。第二段階としてRR-PSTMのプローブをこの冷却原子集団に近づける。冷却原子がプローブから出射するエバネッセント光場に飛び込んだとき，この原子をエバネッセント光のもつ双極子力により形成されるポテンシャルの井戸に捕獲する。安定な捕獲のためには実際には対向する複数のプローブの対を用いる。第三段階としてプローブを移動し，捕獲した原子を冷却結晶基板上に移動する。そして，さらにもう一つの押し出し用プローブを用意しておき，これから光を出射させ，原子を加速・加熱して押し出し，結晶基板上に付着・固定させる。ここで，問題となる点は安定なポテンシャル井戸の形成法およびそれに必要なレーザー光パワーである。この概略値を知るために，セシウム原子を例にとって計算した結果，光糖蜜中の原子温度が0.1mKのとき，開口径 $a/\lambda = 1 \times 10^{-2}$ なるピックアップを用いれば，プローブへの必要入射パワーは約1mWでよいことがわかった^{28,29)}。この値は既存の半導体レーザーにより実現可能である。ごく最近，この考え方を支持する関連実験結果が報告された³²⁾。ただし，この報告では我々のような微小開口プローブを用いてはいないので，必要レーザーパワーは1W以上であった。従って，単一原子結晶成長には光糖蜜とともに微小開口プローブが必須要素であると言えよう。この方法の類形として，結晶基板上に原子を一個ずつ積み上げ，単一原子レベルの細線(Atomic Tower, Whisker)やQuantum Pointの形成，などが考えられる。

6. おわりに

従来十分には実現していなかった光の空間的局在を利用し，超解像センサー，極微プロセッサとして働き得るPSTMについて，我々の研究を中心にご紹介した。光技術を補助手段として使っている高分解能顕微鏡としてAFMがあるが，これに対し，PSTMは光を主手段として使い，光でなくては実現しない超高性能を実現していると言えよう。AFMでは原子間力は距

離の ~ 2 乗で変化するが、PSTMではエバネッセント光パワーは指数関数的に変化するので厚み方向分解能を向上させる上で有利である。4.(4)節で述べたように測定方式を注意深く検討すれば面内分解能も原子レベルに達する可能性がある。今後、このような手法は極限技術にますます利用されていくと考えられる。特に、近視野波動光学は未開発の分野であり、量子光学の手法と組み合わせればさらに新奇な極限光学システムの実現も可能である。

これらのシステムに必要な要素として、半導体レーザー、光ファイバー、光集積回路、などがあるが、これらの要素の開発のいくつかは我が国が世界をリードしていることを考慮すると、PSTMは我が国が先頭に立って研究すべき課題であるといえる。PSTMをセンサーとしてのみ使うと自ずからその波及効果は制限されるが、使用範囲をプロセッサまで拡大すれば、その波及効果は大きい。PSTMも従来の各種のSTMと同様、学際的な研究課題である。光学分野だけに留まらず、他分野との協力が研究発展のための必須条件といえる。逆にこのような協力により研究が発展すれば、光学が広範な分野の新しい科学技術の基幹研究分野となり得る。現在の光学はこのような過渡的な状況に差し掛かっていると思われるので、この好機を逃すべきではないと思われる。

謝辞

光ファイバーに関しご討論頂いた藤倉電線(株)の宮本末広氏に感謝致します。また、本研究を進める上でご協力頂いた、本学学生富田直幸(現在、日産自動車(株))、P. トガル、藤江嘉彦、山田和延の各氏、さらにご討論頂いた中川賢一博士に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 大津元一：コヒーレント光量子工学，朝倉書店，東京，1990。
- 2) U. C. Fischer, U. T. Durig and D. W. Pohl: Appl. Phys. Lett., 52 (1988) 249.
- 3) U. Durig, D. W. Pohl and F. Rohner: J. Appl. Phys., 59 (1986) 3318.
- 4) R. C. Reddick, R. J. Warmack and T. L. Ferrell: Phys. Rev. B, 39 (1989) 767.
- 5) E. Betzig, M. Isaacson and A. Lewis: Appl. Phys. Lett., 51 (1987) 2088.
- 6) D. Courjon and J. M. Vigouroux: Appl. Opt., 29 (1990) 3734.
- 7) J. M. Guerra: Appl. Opt., 29 (1990) 3741.
- 8) 岡本隆之，山口一郎：光学，19 (1990) 682.
- 9) 蔣曙東，富田直幸，大津元一：光学，20 (1991) 134.
- 10) 大津元一：Opt. Eng., 30 (1991) 90.
- 11) 大津元一：日本光学会，第28回サマーセミナー予稿集，(1991年8月)。
- 12) 西川治：応用物理，50 (1981) 807.
- 13) 蔣曙東，大澤日佐雄，P. トガル，山田和延，今井健策，猪飼篤，大津元一：応用物理学会講演会予稿集，(1991年10月)発表予定。
- 14) 富田直幸，蔣曙東，藤江嘉彦，中川賢一，大津元一，大澤日佐雄，大津元一：応用物理学会講演会，(1991年3月)，30pQ2/II。
- 15) S. Jiang, N. Tomita, K. Nakagawa and M. Ohtsu: Technical Digest of Conf. on Lasers and Electro-Optics, Baltimore, May 1991, paper no. CTh05.
- 16) S. Jiang, N. Tomita, H. Ohsawa and M. Ohtsu: Jpn. J. Appl. Phys., 30 (1991) 9月号，印刷中。
- 17) S. Jiang, N. Tomita, K. Nakagawa and M. Ohtsu: Proc. of the 3rd Optoelectronics Conference, Makuhari Messe, 1990, paper no. 12D1-3.
- 18) C.-H. Shin and M. Ohtsu: Opt. Lett., 15 (1990) 1455.
- 19) C.-H. Shin and M. Ohtsu: IEEE Photon. Tech. Lett., 2 (1990) 297.
- 20) D. Hils and J. L. Hall: Proc. of Frequency Standards and Metrology Sympo., ed. by A. De Marchi, Springer-Verlag, Berlin, (1988) 162.
- 21) P. F. Marella and R. F. Pease: Appl. Phys. Lett., 54 (1989) 2366.
- 22) J. Stone and L. W. Sultz: Electron. Lett., 23 (1987) 781.
- 23) J. Bergquist, NIST, USA, 私信，1991.
- 24) M. Fukuma, I. Ogasawara, A. Nishimura and S. Suzuki: Proc. of the 6th International Conf. on Integrated Opt. and Opt. Fiber Commun., January 1987, Reno, Nevada, paper no. W17.
- 25) 矢島達夫：「光の量子効果」，(「量子力学と新技術」，第9章)，日本物理学会，培風館，(1987) 182.

- 26) K. Tanaka, A. Ikai and K. Kameyama: J. Bio. Chem., **263** (1988) 16209.
- 27) 粕谷敬宏, 塚越幹郎: 応用物理, **57** (1988) 1035.
- 28) 大津元一, 蔣曙東, 富田直幸, 中川賢一, 藤江嘉彦: 応用物理学会講演会予稿集, (1990年9月) 27aL9/Ⅲ.
- 29) S. Jiang, N. Tomita, K. Nakagawa and M. Ohtsu: Tech. Digest of Conf. on Lasers and Electro-Optics, Baltimore, May 1991, paper no. CThO5.
- 30) D. M. Eigler and E. K. Schweizer: Nature, **344** (1990) 525.
- 31) D. Sesko, C. G. Fan and C. E. Wieman: J. Opt. Soc. Am. B, **5** (1988) 1225.
- 32) M. A. Kasevich, D. Weiss and S. Chu: Opt. Lett., **15** (1990) 607.