



## フォトン走査トンネル顕微鏡

大津 元一

東京工業大学総合理工学研究科 〒226 横浜市緑区長津田 4259  
 神奈川科学技術アカデミー・大津「フォトン制御」プロジェクト  
 〒213 川崎市高津区坂戸 3-2-1, KSP 東棟 408

(1994年8月5日受理)

### Photon Scanning Tunneling Microscopes

Motoichi OHTSU

Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,  
 4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226

Ohtsu "Photon Control" Project, Kanagawa Academy of Science and Technology,  
 408 KSP East, 3-2-1, Sakado, Takatsu-ku, Kawasaki 213

#### 1. ま え が き

従来取り扱われている光は自由空間または波長にくらべ大きな領域を伝搬している。この光を用いた光学顕微鏡の分解能は回折効果により決定される。しかし物質表面にしみ出たエバネッセント光を用いると回折限界を越える分解能をもつ光学顕微鏡が可能となる。これはフォトン走査トンネル顕微鏡(フォトン STM)と呼ばれる。エバネッセント光は物質表面に近接した領域にある場であることからフォトン STM および関連する光学現象に関する研究分野は近接場光学(near field optics)と呼ばれる。フォトン STM の原理と提案は60年前にさかのぼるが<sup>1)</sup>、その実験は1980年代に入ってから開始された<sup>2)</sup>。しかしここ数年その研究開発が急激に活発化している。その理由は近接場光学の基礎となる科学技術、さらに応用可能分野が図1に示すようにきわめて広い分野、特に将来の科学技術に関わる分野と密接に関わっているからである。

フォトン STM については過去に本誌で紹介させていただいているので<sup>3)</sup>、本稿ではその後の国内外の研究の進展のようす、さらに微細加工技術の一つである超高密度光記録の試みについてご紹介する。

#### 2. 原理と構成

物体に光を照射するとその表面では光は反射、透過

し、伝搬していく。そのとき同時に物体表面にはエバネッセント光が発生している。エバネッセント光は光照射により物体中に生じた分極の間の局所的相互作用を光として表現したものに他ならない。したがって上記の反射光、透過光と異なり、遠方へ伝搬せず、分極近傍に局在している。すなわち、エバネッセント光とはこのような電磁的相互作用が物質表面に露出したものである<sup>3)</sup>。

図2にフォトン STM の基本的構成を示す。先端の鋭いプローブを試料表面付近で走査しながらこのエバネッセント光を散乱して伝搬光に変換し、そのパワーを検出してプローブの位置の関数として図示すれば試料表面の三次元的像が表示できる。このとき像の分解能はプローブ先端の鋭さによって決まるので、通常の光学顕微鏡とは異なり光の回折限界を越えることができる。

光子(フォトン)は電磁相互作用を媒介する光の量子である。従来の光学や光エレクトロニクスでは真空中や光ファイバなどの媒質中を伝搬しエネルギーや情報の伝達を担う光学がもっぱら興味の対象となってきた。しかし、近距離での電磁相互作用(例えばイオン間のクーロン力や近接原子間の振動電気双極子相互作用など)も光子を通じて媒介されると考えられる。フォトン STM とはこのようなきわめて近距離での電磁相互作用を光子のトンネリングと考え、外部に伝搬する実光子を情報の担い手として用いてこの相互作用を観測する装置といえる。

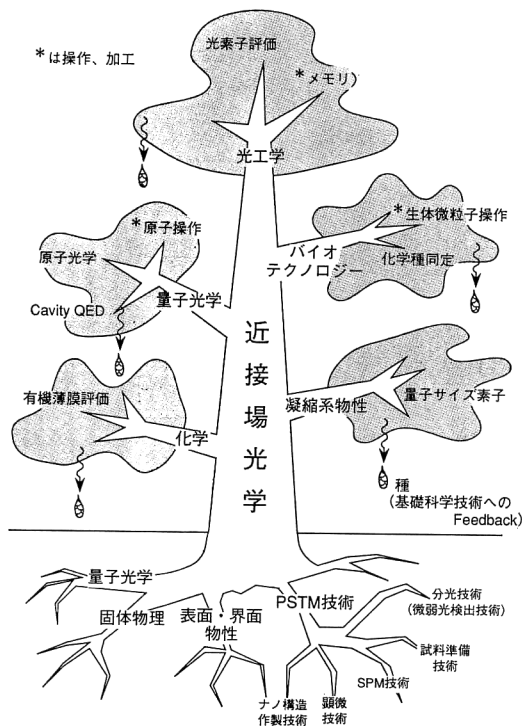


図1 近接場光学とその基礎分野、応用分野の関係

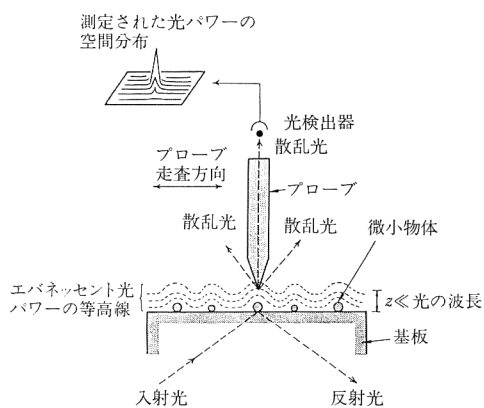


図2 フォトン STM の基本的構成

### 3. 顕微鏡システムの性能

#### 3.1 プローブ

フォトン STM の分解能を決めるものはプローブ先端形状である。従来、ガラス性のマイクロピペットを加熱して引き伸ばしたもの<sup>4)</sup>、光ファイバを加熱して引き伸ばしたもの<sup>5)</sup>、さらには微小球を用いるもの<sup>6)</sup>、などがプローブとして用いられてきた。われわれは製作の際の高い再現性、先端曲率半径を 10 nm 以下にすること、高

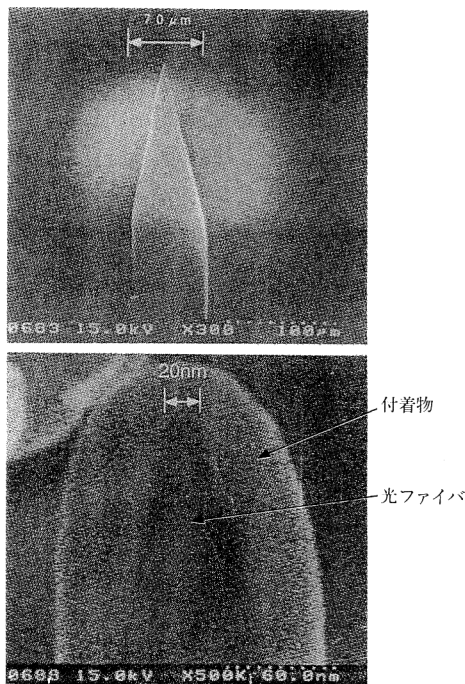


図3 ペンシル形プローブの電子顕微鏡写真(上)とその先端部拡大図(下)<sup>9,10)</sup>。下図の最外部は電子顕微鏡による観測時に付着した汚れ、内部が金属膜の蒸着された先鋭化光ファイバ。

い集光効率を得ること、などを旨として、光伝送用のファイバを緩衝フッ酸溶液で選択化学エッチングし先鋭化することを試みている<sup>7)</sup>。NH<sub>4</sub>F の体積比を調節することによりコア部のみを先鋭化し、さらには二段階エッチングによりクラッド部を細径化すること<sup>8)</sup>、四段階エッチングによりクラッド部の角のないペンシル形にすること<sup>9,10)</sup>、などが可能である。先端形状の電子顕微鏡写真を図3に示すが、10 nm 以内の先端曲率半径が実現している。また、先鋭角の最小値は15度になる。

選択化学エッチングで先鋭化できる理由については反応生成物のエッチング液への溶解速度の差、ファイバ線引きの際に生じたコア・クラッド境界の残留応力などによると解釈されているが、まだその理由は明らかにされていない。また先端が数 nm の形状になったガラスファイバのアモファス性が保存されているか否かについても明確ではない。このようにナノ構造をもつプローブの物性そのものにも多くの興味深い問題がある<sup>11)</sup>。

先鋭化したプローブの根元に金属膜をコーティングし、先端部分の金属膜を KI 溶液により除去してファイバ先端部を露出させ、開口を形成することが試みられている。先端部の電子顕微鏡写真を図4に示すが、開口径 30 nm が実現している<sup>10)</sup>。

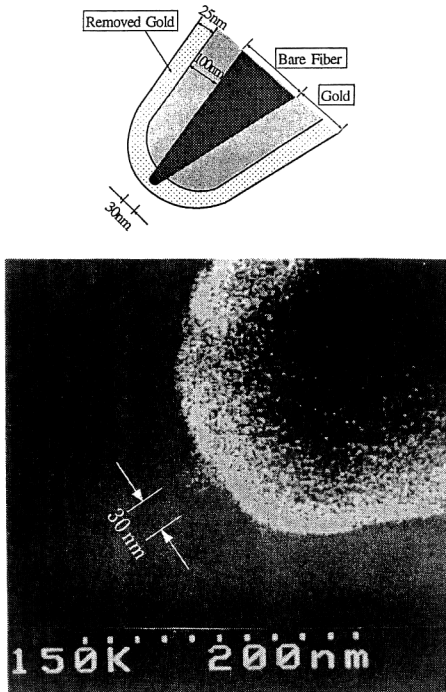


図4 金属膜を除去しファイバ先端部が露出したプローブの断面説明図(上)とその電子顕微鏡写真(下)<sup>10)</sup>

3.2 装置の構成

(1) プローブ位置制御: 図2のように光を試料裏面から全反射角で入射させ、発生したエバネッセント光をプローブでピックアップする方法のほかに、プローブ先端にエバネッセント光をしみ出させ、これを試料により散乱光に変換して測定する方法などがあるが、フォトンSTMの装置で重要なのはプローブの位置制御である。そのためにプローブと試料との間のせん断応力をモニターする方法が考案されている<sup>12)</sup>。このほかに上記の二段階エッチングによりクラッド部が細径化されたプローブをわずかに傾けて試料に近づけ、試料との間の原子間力によるたわみをモニターしてプローブ位置を制御する方法もある<sup>13)</sup>。これらの方法を使うとプローブと試料との間隔を制御することができるのみでなく、フォトンSTM像と同時にAFM像が測定できる利点を有する。

(2) 検出系の雑音: 検出される光パワーは数 pW ~ 数 nW なので低雑音の測定環境を準備する必要がある。フォトンSTM独自の雑音源は光検出の際のショット雑音である。われわれの雑音のパワースペクトル密度測定結果の例では、フーリエ周波数 10 Hz 以上ではショット雑音が支配的であり、対応する縦方向分解能は  $3 \text{ pm} / \sqrt{\text{Hz}}$  であった。10 Hz 以下では音響振動の影響により

雑音レベルが大きく、フーリエ周波数 1 Hz では対応する縦分解能は 0.1 nm であった。

上記の光パワー直接検出方式の他に共振形プローブを用いたヘテロダイン検出法も提案されているが<sup>14)</sup>、その場合微小開口をもつQ値の高い微小共振器を作成することが課題である。

なお、フォトンSTMのショット雑音として、光の場の0点揺らぎのみを考えるのでは不十分であると思われる。すなわち、雑音の発生源は物質表面の分極とエバネッセント光の場とが結合した箇所であるので、小数個の素励起の0点揺らぎの大きさを評価する必要がある。このような意味でエバネッセント光の検出には通常の実光子の検出とは異なる雑音が含まれている。

(3) 測定試料の準備: 一辺 1 μm 以下の視野で像を観測するために、試料を基板に固定する際には注意が必要である。すなわち、試料固定時に散乱光発生源を作らないこと、などである。生体試料の基板への固定にはAFM像観察用試料に対する手法が使われている。フォトンSTMの特長の一つは大気中での観察が可能なことであるが、そのときは試料とプローブとの間の水分子の存在、誘電体試料表面の帯電荷などに注意する必要がある。

3.3 測定例

(1) 形状観測: フォトンSTMの分解能を評価するために各種の微粒子が観測されている。誘電体のラテックス球<sup>15)</sup>、バクテリオファージ T4<sup>16)</sup>などが観測されている。さらに図5に示すのは直径 25 nm のサルモネラ菌の鞭毛の測定例である。分解能は数 nm に達している。今後、システム性能の向上により高分解能化が進むであろう。

(2) 光素子評価: フォトニクス用微小素子の評価が行われている。図6はプロトン交換 LiTaO<sub>3</sub> 導波路の

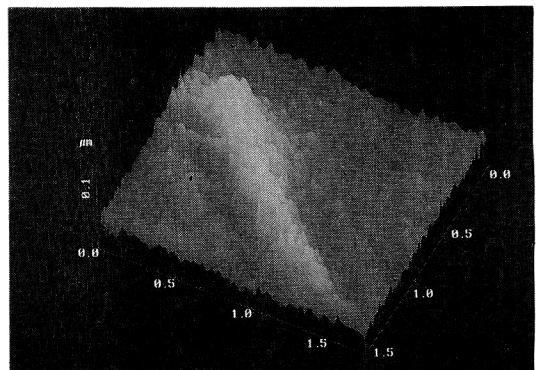


図5 サルモネラ菌の直径 25 nm の鞭毛の観測像

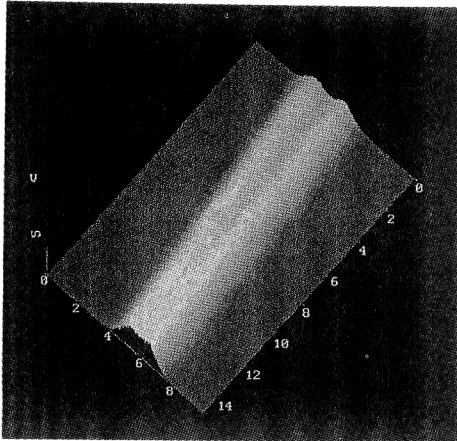


図6 プロトン交換 LiTaO<sub>3</sub> 製のY分岐光導波路の導波モードの観測像<sup>17,18)</sup>

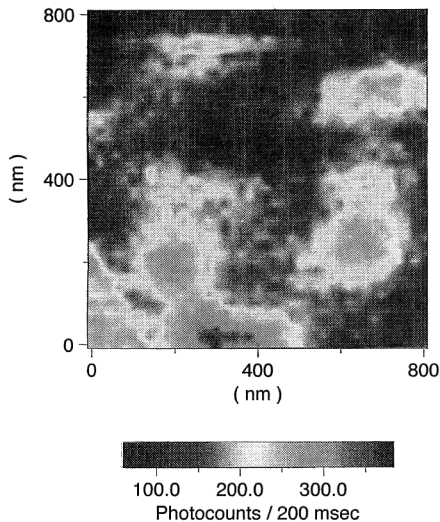


図7 色素ドーブされた直径 100 nm の複数個のラテックス球からの蛍光測定結果<sup>20)</sup>。図下部の色素示は測定時間 200 ms 間に測定されたフォトン数を表す。

導波モードの測定結果であるが、これより波長以下の寸法をもつ散乱源の同定、ビーム伝搬法による計算結果との比較などがなされ、光導波路の非破壊・高分解能評価法を提示している<sup>17,18)</sup>。一方、半導体の量子細線の形状測定なども試みられている<sup>19)</sup>。

(3) 蛍光測定と分光実験：他の走査プローブ顕微鏡と異なり、フォトン STM では入射光により励起された試料からの蛍光を局部的に測定することが可能である。ただしこの場合、光子計数法などの微弱光検出技術を組み合わせる必要がある。一例として、図7に色素がドーブされたラテックス球からの蛍光像を示す<sup>20)</sup>。

さらにフォトン STM の特長として入射光の波長を掃引することにより試料の局部的光学スペクトルが観測可能である。これにより試料形状のみでなく、試料構造、特に生体試料の場合には局所的な化学種の同定が可能となる。今までに応力下のルビーの蛍光スペクトル<sup>21)</sup>、ダイヤモンドのラマンスペクトル<sup>22)</sup>、さらには単一色素分子からの蛍光スペクトル<sup>23)</sup>が測定されており、またプローブが近づいたときの蛍光クエンチングが検出されている<sup>24)</sup>。これは cavity quantum electrodynamics に関連する現象として興味深い。また、上記の半導体量子細線の蛍光スペクトルが低温にて測定されている<sup>19)</sup>。これらの分光実験では空間的分解能は 100 nm 程度であり、まだ予備実験の段階といえる。最近は分解能は低いが、低温技術、超短光パルスによる励起<sup>25)</sup>、などの技術を組み合わせる分光法の開発が盛んになっている。

(4) その他の関連する実験：金属試料の場合には入射光により表面プラズモンが励起され、測定感度、分解能が向上する。この古くから知られている技術を利用して、数 nm の分解能を達成した実験<sup>26)</sup>、半導体プローブをガラス基板表面に近づけたときに生ずる光励起表面電圧による引力を利用したエバネッセント光検出の実験<sup>27)</sup>など、複合システムが提案されている。

#### 4. 微細加工機としての使用

微細加工の一例としてプローブからエバネッセント光をしみ出させ、その光パワーを用いて光メモリ材料に記録する試みが報告されている。記録寸法はプローブ先端寸法によって決まるので、従来の光記録とは異なり、回折限界を越えた記録が可能になる。光磁気メモリ材料の Co/Pt にアルゴンレーザーを用いて熱モードで記録し、記録寸法約 100 nm、記録密度 45 Gb/inch<sup>2</sup> を得ている<sup>28)</sup>。読み出しもフォトン STM を用いている。記録装置寸法を小型化するために同じ記録を半導体レーザーにより行う試みも報告されている<sup>29)</sup>。

なおこの方法では光の偏光を利用しているが、光波長以下の微小開口からのエバネッセント光の偏光状態は入射光の偏光を保存しないので今後の高密度化の際に問題となる。この点を解決するためにフォトンモードによる記録が試みられている<sup>30)</sup>。

図8にフォトンモードによる記録、再生の原理を示す。すなわち：

【記録】 フォトン STM 用プローブ先端にエバネッセント光をしみ出させ、プローブとメモリ用媒体との距離を光波長以下（すなわち近接場の領域）に保ったまま掃

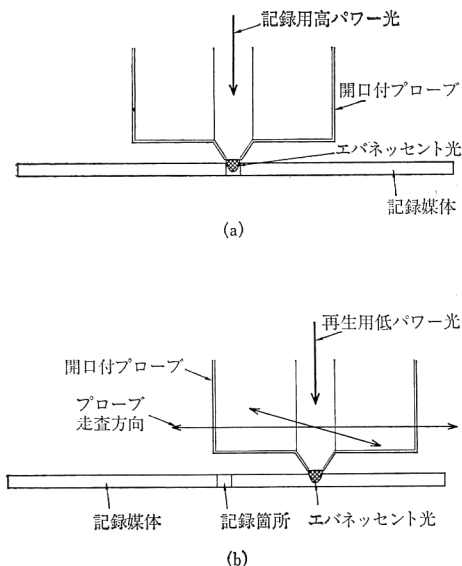
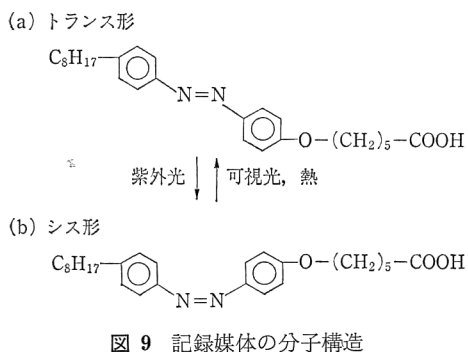


図 8 フォトンモードの光記録(a), 再生(b)の装置の基本構成



引する。このときエバネッセント光のエネルギーにより媒体表面の構造変化を誘起させる。

【再生】 顕微鏡としてのフォトン STM で上記の記録過程での変形, または構造変化を測定する。

フォトクロミック材料であるジアズベンゼン誘導体の LB 膜 (60 層) が記録媒体として使われている<sup>30)</sup>。図 9 に示すように波長 350 nm の紫外光により記録媒体をトランス形異性体からシス形異性体へと変化させることにより記録を行う。上記の紫外光は出力パワー 60 mW のアルゴンレーザーから得た。なお, 実際の記録の際のエバネッセント光パワーは約 30 nW であった。

再生にも同じ光源を用いたが, 出力パワーを 0.6 mW まで減少させている。波長 350 nm における吸光度はトランス形異性体では 0.31, シス形異性体では 0.16 であること, すなわちその差が 0.15 と大きく異なることを

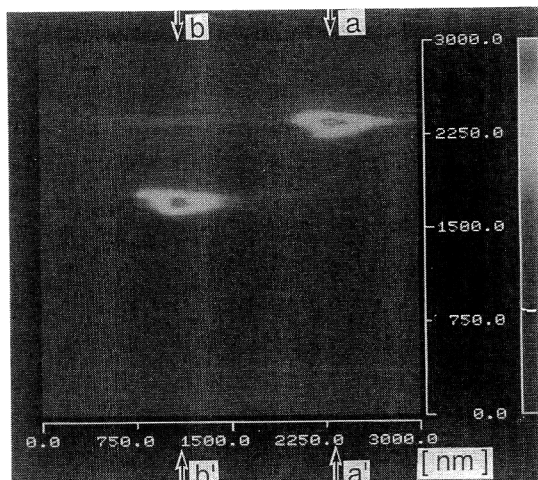


図 10 光記録されたピットの再生像<sup>30)</sup>  
a-a', b-b'に沿った楕円形状のピットの短軸は約130 nm. 図の一辺は 3 μm に相当。

利用し, 再生には同じ装置をフォトン STM として用い, 記録媒体の透過率の面内での局所変化を測定することにより行った。このとき両異性体を透過するエバネッセント光パワーの差は 0.3 nW であった。図 10 には再生結果の例を示す。二つの楕円状スポットがシス形異性体に構造変化している箇所であり, ピットに相当する。ピットと背景部との透過率の差は 0.08 であり, 上記の値 (0.15) とは異なる。この理由としては微小光パワー領域での吸光度の減少 (すなわち光パワーに対する吸光度の非線形性) が挙げられる。

なお, この図ではそれらの直径は約 130 nm であり, 記録時の光波長以下の値になっている。これらの直径の値は記録中のプローブ位置の横方向揺らぎに依存する。長期変動は周囲温度揺らぎによるドリフトであった。

ドリフトを除去するためにはプローブ位置制御が有効である。われわれは二段階エッチングによってファイバ・クラッド先端部を細径化したものをわずかに傾けて記録媒体表面上で走査し, 記録媒体との間の原子間力によるプローブのたわみをモニターし, プローブ位置を制御した。この結果, プローブの縦方向位置の揺らぎは 0.1 nm 以下に抑圧することができた。横方向揺らぎについては未だ十分に定量的な評価をしていないが, 非制御時にくらべ明らかに減少している。

ここで示した近接場光学による光記録・再生方式はまだ研究開発の初期段階であり, さらに進展させるには下記の基本的な問題を解決する必要がある。

- (1) 最適記録媒体の探索

- (2) プローブへの入力可能レーザー光パワーの上限とプローブ熱破壊限界の推定
- (3) 再生の際の光検出雑音の評価と記録密度上限、再生速度上限の推定

しかし記録できるピット径は最終的にはプローブ先端曲率半径により制限される値まで小さくすることが期待され、数 nm となり得る。この意味で本方法は超高密度の光記録実現のための有望な方法といえる。また、ここで示したフォトンモードの光記録は見方を変えれば局所的な光化学反応の実験と考えることができる。したがって熱モードによる方法もあわせ考えると光記録のみならず、将来はその他の極微加工、すなわち、レーザートリミング、レーザーアニーリング、マニピュレーションなどへの発展も期待できる。

ところで極限的な微細加工の方向を示す研究として、最近では三次元構造をもつエバネッセント光を用いた原子操作が活発になっている。たとえば、微小リング共振器の whispering gallery mode から共振器外周にしみ出すエバネッセント光による原子の周回<sup>31)</sup>、さらに中空ファイバ中にしみ出したエバネッセント光による原子導波路<sup>32)</sup>、さらには凹状先端をもつファイバからのエバネッセント光中による原子の捕獲<sup>33)</sup>、などの提案がなされている。われわれもすでにプローブ先端にしみ出すエバネッセント光により真空中に浮遊する原子を一つずつ捕獲する方法を提案している<sup>34,35)</sup>。これらの操作、捕獲のためのポテンシャルの深さは原子の熱運動等価温度にして数十  $\mu\text{K}$  ~ 数  $\text{mK}$  であることが多いが、すでにレーザー光を用いた原子冷却法により  $1 \mu\text{K}$  以下が実現しているので<sup>36)</sup>、この原子冷却法を用いれば操作、捕獲のために十分な低エネルギー原子群が準備でき、実験技術に関して本質的な問題はない。

以上の原子操作は少数個の原子と光子との相互作用の研究に対する興味のみでなく、捕獲された原子を冷却結晶基板の上の一つずつ固定して単原子レベルの結晶成長を行うことにも応用が期待される。

## 5. おわりに

近接場光学を応用した装置であるフォトン STM は高分解能の光学顕微鏡のみでなく、加工機、操作機として利用可能である。また、その素過程は物理学の基本的問題にも深く関わっており、さらに応用分野は広い。このような事情からフォトン STM は将来の重要な光学の研究課題と思われる。

最近フォトン STM 装置の市販品も現れ、ユーザー

数も増えている。研究人口も増加し、既に過去二回の国際会議が開催されている<sup>37,38)</sup>。第三回は来春チェコのパルノ市で開催されることが決まっている。また、日本でも研究人口が活発化し、応用物理学会・日本光学会により近接場研究グループが発足している。今後は凝縮系物理、表面・界面物理、量子光学、などの分野を融合した新しい光学の研究分野として発展することを期待したい。

実験結果の写真をご提供いただいた神奈川科学技術アカデミー、物部秀二氏 (図3, 4)、納谷昌之氏 (図5)、齋木敏治氏 (図7) に感謝します。

## 文 献

- 1) E. H. Syngé: "A suggested method for extending microscopic resolution into ultra-microscopic resolution," *Phil. Mag.*, **6** (1928) 356-362.
- 2) E. Betzig and J. K. Trautman: "Near-field optics: microscopy, spectroscopy, and surface modification," *Science*, **257** (1992) 189-195.
- 3) 大津元一, 堀 裕和: "フォトン STM の実験と理論", *光学*, **21** (1992) 780-788.
- 4) E. Betzig, M. Issacson, H. Barshatzky, A. Lewis and K. Lin: "Near-field scanning optical microscopy (NSOM)," *Proc. SPIE*, **897** (1988) 91-99.
- 5) U. Durig, D. Pohl and F. Rohner: "Near-field optical scanning microscopy with tunnel-distance regulation," *IBM J. Res. Dev.*, **30** (1986) 478-483.
- 6) 片岡俊彦, 高田和政, 遠藤勝義, 井上晴行, 森 勇蔵, 穂垣耕司: "走査型近接場光学顕微鏡 (SNOM) の開発IV", 第41回応用物理学関係連合講演会, 28 aC 4 (1994).
- 7) T. Pangaribuan, K. Yamada, S. Jiang, H. Ohsawa and M. Ohtsu: "Reproducible fabrication technique of nanometric tip diameter fiber probe for photon scanning tunneling microscope," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) L1302-L1304.
- 8) T. Pangaribuan, S. Jiang and M. Ohtsu: "Two-step etching method for fabrication of fibre probe for photon scanning tunneling microscope," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 1978-1979.
- 9) 物部秀二, R. ウママヘスワリ, 齋木敏治, 納谷昌之, 大津元一: "フォトン走査トンネル顕微鏡用ペンシル形ファイバプローブの作成", 第41回応用物理学関係連合講演会, 28 pD 1 (1994).
- 10) 物部秀二, 納谷昌之, R. ウママヘスワリ, 齋木敏治, 大津元一: "フォトン走査トンネル顕微鏡用ペンシル用ファイバプローブと微小開口の作製法", 第13回光波センシング技術研究会, LST 13-13 (1994).
- 11) R. ウママヘスワリ, 物部秀二, 納谷昌之, 齋木敏治, 大津元一: "フォトン走査トンネル顕微鏡用ファイバプローブ先端へのナノ開口", 第41回応用物理学関係連合講演会, 28 pD 2 (1994).
- 12) E. Betzig, P. L. Finn and J. S. Weiner: "Combined shear force and near-field scanning optical microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1992) 2484-2486.
- 13) 今井一宏, 興和元伸, 蔣 曙東, 大津元一: "AFM 同時動作可能なフォトン走査トンネル顕微鏡", 第41回応用物理学関係連合講演会, 28 pD 4 (1994).
- 14) S. Jiang, K. Nakagawa and M. Ohtsu: "Reflection-

- resonance-type photon scanning tunneling microscope," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (1994) L55-L58.
- 15) S. Jiang, N. Tomita, H. Ohsawa and M. Ohtsu: "A photon scanning tunneling microscope using an AlGaAs laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** (1991) 2107-2111.
  - 16) S. Jiang, H. Ohsawa, K. Yamada, T. Pangaribuan, M. Ohtsu, K. Imai and A. Ikai: "Nanometric scale biosample observation using a photon scanning tunneling microscope," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) 2282-2287.
  - 17) 戸田泰則, 大津元一: "フォトン走査トンネル顕微鏡による LiTaO<sub>3</sub> 導波路の導波モード観測", 第41回応用物理学関係連合講演会, 30 pG 12 (1994).
  - 18) 戸田泰則, 大津元一: "フォトン走査トンネル顕微鏡による光導波路の高分解能評価", 第13回光波センシング技術研究会, LST 13-15 (1994).
  - 19) R. D. Grober, T. D. Harris, J. K. Trautman, E. Betzig, W. Wegscheider, L. Pfeiffer and K. West: "Optical spectroscopy of GaAs/AlGaAs quantum wire structure using near-field scanning optical microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, **64** (1994) 1421-1423.
  - 20) 齋木敏治, 納谷昌之, R. ウママヘスワリ, 物部秀二, 大津元一: "先鋭化光ファイバ・プローブの分光への応用", 日本物理学会第49回年会, 29 aD 2 (1994).
  - 21) P. J. Moyer, C. L. Jahncke, M. A. Paesler, R. C. Reddic and R. J. Warmack: "Spectroscopy in the evanescent field with an analytical photon scanning tunneling microscope," *Phys. Lett. A*, **145** (1990) 343-347.
  - 22) D. P. Tsai, A. Othonos, M. Woskivits and D. Utamachandani: "Raman spectroscopy using a fiber optic probe with subwavelength aperture," *Appl. Phys. Lett.*, **64** (1994) 1768-1770.
  - 23) W. P. Ambrose, P. M. Goodwin, J. C. Martin and R. A. Keller: "Single molecule detection and photochemistry on a surface using near-field optical excitation," *Phys. Rev. Lett.*, **72** (1994) 160-163.
  - 24) R. C. Dunn, G. R. Holton and X. S. Xie: "Fluorescence spectroscopy on a single molecule basis with a near-field spectrometer," *Tech. Digest of Int. Quantum Electron. Conf. 94*, Anaheim (1994), pp. 2-3.
  - 25) S. Smith, B. G. Orr, R. Kopelman and T. Norris: "Femtosecond near-field scanning optical microscope," *Tech. Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics*, Anaheim (1994), pp. 147-148.
  - 26) M. Specht, J. D. Pedarnig, W. M. Heckel and T. W. Hänsch: "Scanning plasmon Near-field microscope," *Phys. Rev. Lett.*, **68** (1992) 476-479.
  - 27) J. Mertz, M. Hipp, J. Mlynek and O. Marti: "Optical near-field imaging with a semiconductor probe tip," *Appl. Phys. Lett.*, **64** (1994) 2338-2340.
  - 28) E. Betzig, J. K. Trautman, R. Wolfe, E. M. Gyorgy, P. L. Finn, M. H. Kryder and C.-H. Chang: "Near-field magneto-optics and high density data storage," *Appl. Phys. Lett.*, **61** (1992) 142-144.
  - 29) 新谷俊通, 中村公夫, 丸山洋治, 保坂純男, 井村 亮: "半導体レーザを用いた SNOM の試作", 第41回応用物理学関係連合講演会, 31 aMC 7 (1994).
  - 30) S. Jiang, J. Ichihashi, H. Monobe, M. Fujihira and M. Ohtsu: "Highly localized photochemical processes in LB films of photochromatic material by using a photon scanning tunneling microscope," *Opt. Commun.*, **106** (1994) 173-177.
  - 31) H. Mabuchi and H. J. Kimble: "Atom galleries for whispering atoms: binding atoms in stable orbits around an optical resonator," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 749-751.
  - 32) M. A. Ol'Shanii, Yu. B. Ovchinnikov and V. S. Letokhov: "Laser guiding of atoms in a hollow optical fiber," *Opt. Commun.*, **98** (1993) 77-79.
  - 33) J. P. Dowling and J. Gea-Balacloche: "Atomic quantum dot," *Tech. Digest of Int. Quantum Electron. Conf. 94*, Anaheim (1994), pp. 185-186.
  - 34) 大津元一: "フォトンSTM(V)-単原子レベル結晶成長", 第51回応用物理学学会学術講演会, 27 aL 79 (1990).
  - 35) H. Hori, S. Jiang, M. Ohtsu and H. Ohsawa: "A nanometer-resolution photon scanning tunneling microscope and proposal of single atom manipulation," *Tech. Digest of the 18th Int. Quantum Electron. Conf.*, Vienna (1992), pp. 48-49.
  - 36) P. S. Jessen, A. Kastberg, W. D. Phillips, S. L. Rolston and R. J. C. Spreeuw: "Sub- $\mu$ K temperatures by adiabatic cooling in a 3D optical lattice," *Tech. Digest of Int. Quantum Electron. Conf. 94*, Anaheim (1994), pp. 236-237.
  - 37) 大津元一, 堀 裕和: "近視野光学ワークショップ報告", 応用物理, **62** (1993) 292.
  - 38) 大津元一: "第2回近接場光学国際会議報告", 応用物理, **63** (1994) 77.