

解 説

フォトン走査トンネル顕微鏡

蔣 曙東・富田 直幸・大津 元一

東京工業大学総合理工学研究科 T227 横浜市緑区長津田町 4259

(1990年11月12日受理)

Photon Scanning Tunneling Microscope

Shudong JIANG, Naoyuki TOMITA and Motoichi OHTSU

Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology,
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

1. はじめに

有機超薄膜の診断・開発¹⁾さらに、生体類似機能素子、バイオリニアクターの設計、生体細胞膜のゲート機構解明、細胞プロセッシングなどの研究のために、横および縦分解能がおののおの数十nm、数nm以内、広視野、非接触、非破壊、実時間観測可能な顕微鏡の需用が最近急速に高まっている。従来、光学顕微鏡、レーザー顕微鏡、電子顕微鏡(SEM)、走査型トンネル顕微鏡(STM)²⁾、原子間力顕微鏡(AFM)³⁾、などが開発されている。しかし、これらの顕微鏡では視野の広さ、分解能、測定条件、非接触・非破壊性などについては表1に示すようにいずれも一長一短がある。これらの問題点を解決するために、フォトン走査トンネル顕微鏡(photon scanning tunneling microscope: PSTM)が最近注目されている。これは光学顕微鏡のもつ特長(広視野・非接触・非破壊)と走査トンネル顕微鏡のもつ特長(高分解能)とを組み合わせたものと考えられる。本稿ではこのPSTMの原理、研究の現状、今後の研究展望について筆者らの研究内容などをもとに紹介し、さらに、今後の装置改良により、1nm以内の高分解能が可能であることを指摘する。

2. PSTMの原理

光学顕微鏡の分解能は回折限界により制限され、波長と同程度の値になることは周知のとおりである。この分解能限界を超えるためには、マイクロ波の場合には超長基線電波干渉計(VLBI)、開口合成法⁴⁾などが使われている。しかし、光波の場合、波長λは1μm以下であるた

め、これらの方法を直接適用することは容易ではない。しかし、エバネッセント光(すなわち、フォトンのトンネル効果)、と微小開口をもつプローブとを利用すれば、光波領域でも回折限界を超えることが可能である。この考え方に基づいて構成されたシステムがPSTMである。

図1にPSTMの基本原理を示す¹³⁾。試料表面内に沿ってx-y軸をとり、境界面に垂直方向はz軸をとる。全反射条件下では、試料表面上の法線方向z\llなる近視野で考えると、振幅がz軸方向に指数関数的に減少し、エバネッセント光が発生する⁵⁾。光をフォトンと見なしてこの発生機構を解釈すると、二つの媒質の屈折率の値によって決まるフォトン閉じ込めのポテンシャル障壁の高さに依存して、フォトンがトンネル効果により試料外にしみだす現象と考えられる。トンネリング・フォトンの観測確率はzの増加とともに指数関数的に減衰するため、高い縦分解能が得られる。また、このフォトンの場合は光波長λより小さい開口直径a(<math>< λ</math>)をもつプローブにより破壊測定され、フォトンの運動量の測定誤差(これは光の波長の測定誤差 $Δλ/λ = (\lambda/a)$ に比例)は

$$ΔP = \hbar k \cdot Δλ/λ = h/a \quad (1)$$

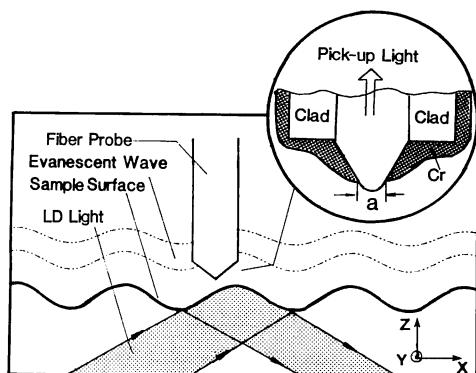
となる。ここで、 \hbar は $h/2π$ 、 h はプランク定数、 k は光の波数である。ハイゼンベルグの不確定性原理によると、この誤差により開口で検出されるフォトンの位置測定の最小不確定性 $Δx$ は

$$Δx = a/2π \quad (2)$$

となり、開口直径aで決まる高い横分解能が得られる。すなわち、従来の光学顕微鏡は回折効果に基づく不確定性原理に従う分解能をもつに対し、ここでは微小開口

表 1 各種高分解能顕微鏡の特徴比較（実用的なシステムの性能の代表値）

	試料の導電性	測 定 量	分 解 能		視 野	測 定 環 境
			縦	横		
光学顕微鏡	不 要				0.5 μm	1 mm
SEM	要	二次電子		3 nm	<5 mm	大気中, 液中 真空中
STM	要	トンネル電子	0.01 nm	0.1 nm	<1 μm	真空中, 大気中, 液中
AFM	不 要	原子間力	0.01 nm	0.15 nm	<1 μm	大気中, 液中
PSTM	不 要	トンネリングフォトン	1 nm	<10 nm	<10 μm	真空中, 大気中, 液中

図 1 PSTM の基本原理図¹³⁾

をもつプローブを用いて、フォトンの位置のスクイージングすることにより横分解能が決まる。以上を要約すると、PSTM が回折限界を越えた分解能を有する理由はエバネッセント光、微小開口、近視野測定、を採用していることである。

このように、フォトンのトンネル効果の原理を利用して顕微鏡と考えられるので、フォトン走査トンネル顕微鏡と名づけられている。しかし、同時に近視野での光学的測定技術を使うので、近視野顕微鏡 (near field microscope : NFM) とも呼ばれる。現在のところ、十分厳密な名称の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。

3. PSTM のシステムと実験結果

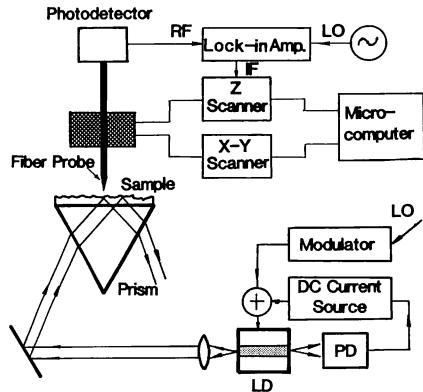
PSTM の基本的手法として、今まで、微小開口からの光放射法^{6,7)}、微小開口による光ピックアップ法⁸⁻¹⁰⁾などがおもに開発されている。また、フォトンのトンネル効果だけを利用した縦分解能を追求する表面顕微鏡^{11,12)}も報告されている。これらの研究で得られた分解能や、精度などをさらに向上させ、また、光源として使われている大形のガスレーザーや、キセノンランプを小形のものに替えて、従来の STM の特長の一つと同様の小形性

を実現するために、筆者らは半導体レーザーを用いて透過形および反射共振形 PSTM を提案し^{13,15)}、分解能を求めるための理論解析と予備的実験を行っている。本節ではこれらの概略を紹介する。なお、透過形については類似のシステムの提案は他所でもわれわれとほぼ同時期になされている⁸⁾。ここで紹介する方法では従来の PSTM 用プローブの位置制御に使われている STM プローブ⁷⁾も不要であるという利点を有する。

透過形の PSTM はレーザーのもつ特性のうち、高パワー密度、波長可変特性を活用したものであり、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。したがって、システム構成は簡単であるが、低パワーのエバネッセント光の測定感度により、分解能が制限されるという問題点を有する。一方、反射共振形はレーザーの高コヒーレンスを利用したものであり、試料表面形状は周波数シフトの測定により求められる。周波数測定はすべての物理量測定のうちで、最も高精度であることは周知のとおりであり、したがって、透過形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、透過形、反射共振形を光通信システムと対応させると、それぞれ強度変調・直接検波方式、周波数変調・ヘテロダイン検波方式に対応する。透過形では試料表面の高分解能測定だけでなく、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、局所的な分光分析、組成分析、などが期待できる。一方、反射共振形はより高い分解能をもつ非破壊測定、細胞プロセッシング、さらに、単原子結晶成長のためのマニピュレータなどにも利用可能と考えられる。

3.1 透過形 PSTM

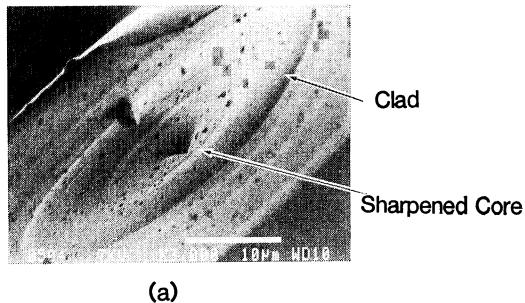
図 2 に透過形 PSTM の基本装置を示す¹³⁾。半導体レーザーの光をプリズムに全反射角で入射させる。プリズムの上面には試料が付着しているので、試料の表面形状に依存するエバネッセント光が発生する。このエバネッセント光を微小な開口をもつ光ファイバープローブによって検出する。同図中では検出感度向上の一例としてレー

図2 透過形PSTMのシステム構成¹³⁾

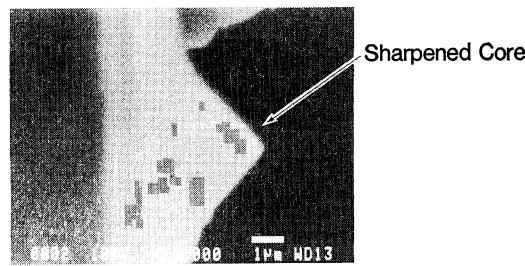
ザーパワーの直接変調・位相敏感検波方式が示されているが、このほかに、試料表面での散乱光の影響を除去するためにプローブの z 軸方向走査用のPZTを変調して、位相敏感検波する方式、さらに、光子計数法など、種々の方式が可能である。半導体レーザーの直接変調帯域は1GHz以上に及ぶので、他のレーザーに比べ、高速測定の利点を有する。試料表面の三次元形状の測定・表示については従来のSTM等と同様の方法を使う。すなわち、プローブを $x-y$ 軸方向に掃引しながら、検出したエバネッセント光パワーが一定となるようプローブの z 軸方向位置を制御し、制御ループの誤差信号により、試料表面形状を測定する。すなわち、この信号を計算機により適当な画像処理を施した後、CRTディスプレイ上に三次元形状を表示する。

高い横分解能を得るためにには微小開口をもつ光ファイバ・プローブが必要である。このプローブの製作方法は従来いくつか提案されているが⁶⁻⁹⁾、われわれはより高精度な製作方法を試みている。すなわち、単一モード光ファイバ（コア径5μm、クラッド径125μm）の先端をフッ酸を用いた選択エッチングによって尖らせる。次に厚さ100~200nmのクロム薄膜を蒸着し、さらにプラズマエッチングあるいはSTMプローブの先端放電により薄膜を除去して、コア先端に微小開口を形成する。図3に先端を尖らせた後のSEM写真を示す¹³⁾。図3(b)により、コア先端の曲率半径は約80nmと推定される。クロム薄膜の蒸着、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。しかし、数十nm以下の開口直径が実現可能であることも指摘されている⁸⁾。また、STMのプローブ先端放電により金の球面の上の特定位置に直径2nmの穴を開けた結果も報告されている¹⁶⁾。

図4(a)に示すようなプリズムの上面の半分に蒸着し



(a)



(b)

図3 ファイバ・プローブの先端 SEM写真¹³⁾
 (a) 先鋭化したコアをもつファイバ先端を斜めから観測したもの。白線のスケールは10μmに相当。(b) 先鋭化したコアを横方向から観測したもの。白線のスケールは1μmに相当。

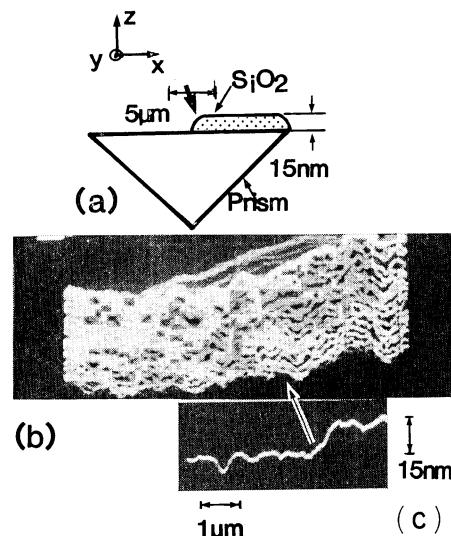


図4 SiO₂薄膜の測定結果¹⁴⁾
 (a) プリズム上のSiO₂薄膜断面の推定図。(b)三次元形状測定例、紙面内での測定範囲を(a)の矢印で示す。(c)プローブを x 軸方向のみに1回掃引したときの結果。

た膜厚 15 nm の SiO_2 薄膜の形状測定を行った¹⁴⁾。その予備実験結果を図 4 (b)に示す。プローブは図 3 に示したものを用いたが、この段階では、クロム薄膜蒸着および開口形成は行わずに使用した。図 4 (c)にはプローブを x 軸方向のみに掃引した結果を示す。信号の S/N 比より、縦分解能は約 2 nm であると推定されている。ただし、この値は位相敏感検波方式における測定時定数 τ が 1 ms の場合の結果である。この時定数は従来の STM などのそれに比べ小さい。これは LD が高速変調可能であることを利用したものであり、高速測定の特長を示している。システムの雑音は白色雑音と仮定すると、縦分解能は $\tau^{-1/2}$ に比例する。したがって、 τ を大きくすれば、さらに高い縦分解能が期待される。

また、横分解能は図 2 のプローブ先端形状より推定すると、100 nm 以内であることは確実であり、数十 nm 以内と概算されている。

3.2 反射共振形

われわれが提案し、ここで紹介する反射共振形 PSTM は波長より小さい径をもつ開口から漏れ出るエバネッセント光により生じた位相差を共振法により高感度測定するものである。なお、類似の考え方に基づく初步的な干渉形マイクロ波走査トンネル顕微鏡もごく最近提案されていることを付記しておく¹⁷⁾。

図 5 に反射共振形 PSTM の基本構成を示す²⁶⁾。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制御しておく。共振器の二つの端面のうち、試料に面した端面には微小開口を設け、共振器を試料に接近させる。このとき、開口からのエバネッセント光が近接する試料表面によって、振動をうける。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調され、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、これを参照用レーザーあるいは他の共振器とのヘテ

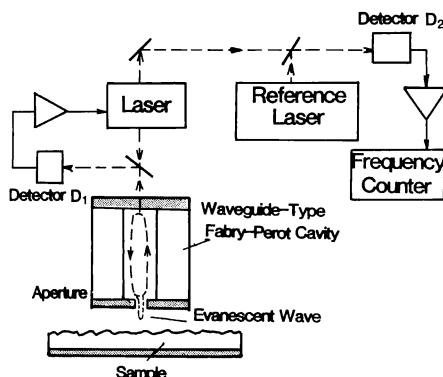


図 5 反射共振形 PSTM の基本構成²⁶⁾

ロダイン信号周波数シフト測定などにより求める。

まず、このシステムの分解能を推定するために、フーリエ変換法^{18,19)}を用いて共振周波数シフト Δf の数値解析を行った。試料表面は平面と仮定した。図 6 の実線は $\Delta f/\text{FSR}$ の a/λ 依存性を示す¹⁴⁾。ここで、FSR は共振器の自由スペクトル幅であり、共振器はコア径 5 μm の単一モードファイバを用いて製作すると仮定している。また、 z/a はおのおの 1.0×10^{-3} , 1.0×10^{-2} である。図中の直線 A～D は共振器のフィネス F、図 5 の光検出器 D_1 への入射パワー P の値に依存して発生するショット雑音により制限されるレーザー周波数の共振器共振周波数への追随限界を示す。すなわち、これらは Δf の測定精度のショット雑音限界に相当する。たとえば、 $F=1 \times 10^2$, $P=10 \text{ mW}$ のとき、ショット雑音限界は $a/\lambda=8.5 \times 10^{-3}$ に対応する。 $\lambda=800 \text{ nm}$ とすると、 $a=6.8 \text{ nm}$ であるので、横分解能のショット雑音限界は約 6.8 nm となる。このとき、もし $\text{FSR}=100 \text{ GHz}$ の共振器を使うとすると、このショット雑音限界に対応する周波数シフトは 14 Hz である。したがって、反射共振形 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筆者らはすでに光・電気 2 重帰還法により線幅 7 Hz の半導体レーザ

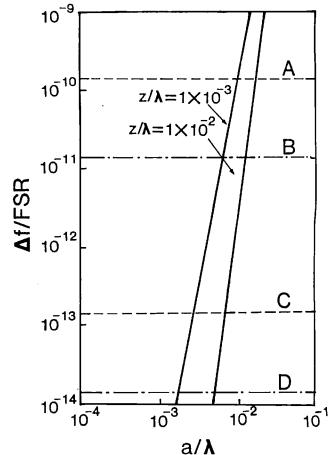


図 6 共振周波数シフト量の開口直径 a 依存性的計算結果¹⁴⁾

λ : 光波長, z : 試料とプローブとの距離, FSR: プローブ用共振器の自由スペクトル域。直線 A～D は共振器フィネス F、図 5 の光検出器 D_1 への入射光パワーがおのおの 10^2 , 10 mW ; 10^2 , 1 W ; 10^5 , 10 mW ; 10^5 , 1 W の場合のショット雑音限界を表す。

ーを実現しており²⁰⁾、ヘテロダイイン形光位同期ループの周波数安定度も 1×10^{-18} を実現している²¹⁾。さらに、 1×10^{-16} のレーザーの周波数安定度も報告されている²²⁾。これらの技術を利用すれば上記の 14 Hz の値は十分測定可能であり、反射共振形 PSTM の実現が期待される。また、以上のショット雑音限界は $1/F\sqrt{P}$ に比例するので、他の任意の F, P の値についても図 5 を元に推定できる。また、これらの計算により、透過形 PSTM の場合と同様に被測定量（ここでは周波数シフト量 Δf ）は z の増加とともに指數関数的に減少することもわかつており、高い縦分解能が期待できる。

反射共振形 PSTM の動作確認のための実験を行った。われわれの手許には分解能評価用の微細な標準試料がなかったので、波長 4.4 cm（周波数 6.8 GHz）のマイクロ波を用いて、シミュレーション実験を行った。図 7(a)に示す断面をもつアルミ板を試料として用い、共振器を x 軸方向に移動して得られた形状測定結果を図 7(b)に示す¹⁴⁾。試料の二つの突起間隔 b が開口径 a より小さいにも係わらず、図 7(b)では二つのピークが明確

に現れている。このことから、開口直径 a と同程度以下の寸法の形状が測定可能な横分解能をもつことが確認された。これはエバネッセント光のパワーが開口中心部に集中しているためと考えられる。

さらに、測定時定数 τ や、図 7(a)中の a, b, d 等の値を変化させて、一連の実験を行った結果、縦分解能、横分解能の最良値として、おのおの、 $5 \times 10^{-3}\lambda, 5 \times 10^{-2}\lambda$ が得られている。今後、測定条件の改良により、いっそうの分解能向上が期待される。

4. 今後の展望

4.1 PSTM の性能向上のための課題

PSTM の感度・分解能をいっそう向上させるためにまずは、近視野波動光学理論の確立が必須である。いままでは近視野波動光学の需要が少なかったため、近視野波動光学領域での Maxwell 方程式を適切な境界条件で解く近視野波動光学理論は未発達な部分を有する。原子の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が必要であろう。最近では超微細加工技術の進歩に伴い、PSTM だけではなく、微小光学、微小共振器レーザー²³⁾などの実現により近視野波動光学理論の必要性が増し、さらに共振器内量子電気力学 (cavity QED) の研究²⁴⁾の進歩とともに、上記の理論確立がいっそう重要なとなっている。

第 2 の課題は要素作成技術の確立である。透過形の場合のファイバ研磨、コーティング、微小開口作成技術の改良により微小開口作成技術の向上が期待される。反射共振形の場合、大きな F および FSR も共振器の実現、さらに温度、振動などによる共振周波数ドリフトの補正法が確立すべき要素技術である。単一モードファイバを用いて、誘電体多層膜蒸着により、 $F \geq 200, FSR \geq 100$ GHz（共振器長 < 2 mm）の値が報告されている²⁵⁾。また、スーパー共振器では $F = 120,000$ もすでに実現している^{*1}。今後さらに、プレーナ技術（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。また、共振器の代りに、プロセス技術の進歩により、半導体レーザーチップのへき開面の特定の場所に、数十 nm の開口を作り、半導体レーザーを、增幅機能を持つ反射共振形プローブとして使うことも期待されている^{26,27)}。

このほか、分解能評価用の標準試料の選定、用意も今後重要となろう。

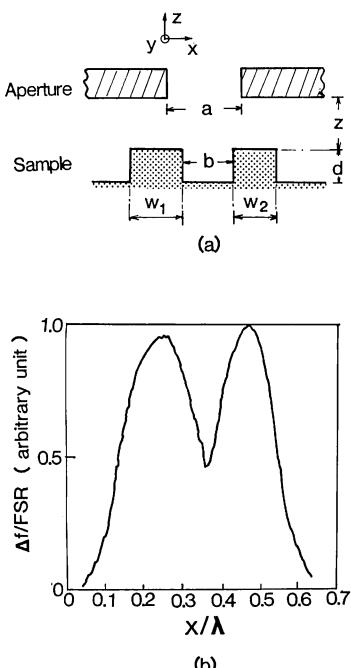


図 7 マイクロ波による表面形状の測定結果¹⁴⁾
(a) 試料と開口の断面形状。(b) 共振器を x 軸方向に掃引して得られた測定結果。
(a) 中の a, b, d, w_1, w_2, z 、さらに測定時定数 τ は次のとおり: $a/\lambda = 0.20, w_1/\lambda = 0.13, w_2/\lambda = 0.11, z/\lambda = 0.02, d/\lambda = 0.09, \tau = 10$ ms。

*1 J. Bergquist (NIST, USA) からの私信 (1990 年 8 月)

4.2 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・実時間形状測定機としての広い応用範囲を有する。まず、有機超薄膜などの表面形状を広視野で観測しながら、光源波長を掃引して各部分での局所的な構造解析が可能となる。さらに結晶表面に吸着した原子、分子層の評価、高密度集積回路の評価、などが可能である。さらに、生命理工学分野では生体細胞膜、DNA、特に種々のウイルス²⁸⁾などの形状が非破壊で測定可能であろう。また、複数個のプローブを用いて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、などに威力を発すると考えられる。

一方、PSTM をたんに測定機として使うのではなく、加工機としての応用可能性が重要である。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²⁹⁾。一方、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(シリコン、ゲルマニウム、ヒ素、ガリウム、など)にも適用な加工機となりうる。

その一例として、筆者ら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³⁰⁾。これは三段階からなる。まず、第一段階で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する。現在までに報告されている最低温度は数 μK である³¹⁾。第二段階として反射共振形 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めば、この原子はエバネッセント光のもつ勾配力によるポテンシャルの井戸に捕獲される。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。捕獲された原子の位置制御には、原子捕獲の結果互いに対向するプローブに生じる共振周波数シフト値が等しくなるような光位同期ループを施す。また、捕獲原子数のモニターにはこの共振周波数シフト値を測定する。簡単な計算によるとこれらのシフト値は筆者らの開発した高コヒーレント半導体レーザーおよび光位同期ループにより十分測定可能であることが確認されている³⁰⁾。以上により、単一原子をエバネッセント光場中に安定に捕獲できる。

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、問題となる点はプローブに入

射させるレーザー光パワーの必要値である。

これを知るためにセシウム原子を例にとって計算した結果を図 8 に示す³⁰⁾。この図中、パラメータは光糖蜜の等価原子温度 T である。この図によると、たとえば原子温度 $T = 0.1 \text{ mK}$ のとき、開口径 $a/\lambda = 1 \times 10^{-2}$ なるプローブを用いれば、必要入射パワーは 1 mW でよいことがわかる。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^{32,33)}。これは光糖蜜から落下した原子をエバネッセント光により跳ね返し、原子のトランボリン運動を実現する試みである。ただし、われわれ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われわれの場合より高く、 1 W 以上であった。したがって、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いえよう。

このような極限的結晶成長の類形として、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(whisker)形成、さらにこのほかにも超高密度集積回路のトリミング、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光を打ち込んで二次電子を放出させる可能性、などが考えられる。

一方、細胞プロセッシングの分野では、従来より使われていたレーザー顕微鏡³⁴⁾の代りに 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れば、細胞への DNA の打ち込み精度が向上するであろう。

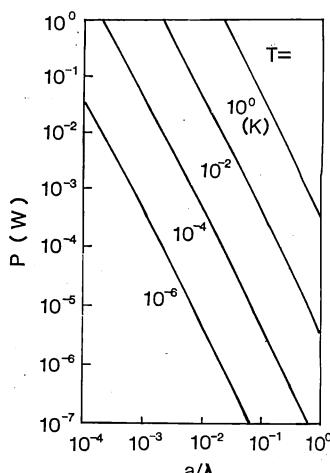


図 8 単一原子の捕獲に必要な入射レーザー光パワー P の計算値³⁰⁾
横軸はプローブ開口直径 a を光波長 λ で規格化したもの。パラメータ T は光糖蜜中の等価原子温度。

4.3 超高分解能を目指して

PSTM システムの性能は急速に向上しており、とくに反射共振形では STM と同等以上の分解能も期待できる。さらに STM などの性能を追い越し、超高分解能を実現するためにはいくつかの手法が考えられる。まず、マイクロ波周波数帯で採用されている開口合成法の使用可能性である。すでに製作されているマルチコア・ファイバ³⁵⁾、またはプレーナ・プロセス技術を用いれば近接した複数個のプローブをモノリシックに製作することが可能である。このマルチ・プローブ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 プローブ先端に原子が複数個ある場合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 STM の分解能はさらに向上し得る。PSTM における上記のマルチ・プローブ法はこれに対応している。

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 は表 1 にある各種顕微鏡の中でとくに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決まるが、光子数スクイズ状態³⁶⁾の光を利用すれば、この雑音レベルを越える super-quantum microscope の実現可能性も期待できる。

5. おわりに

非接触・非破壊の超解像光学顕微鏡として有望なフォトン走査トンネル顕微鏡（PSTM）について概説した。従来、光が高分解能の顕微鏡システムに利用されている一例として AFM がある。このシステムはすでにヘテロダイン法、光てこ法など、光技術を補助手段として使っている。しかし、PSTM は光を補助手段としてではなく、光の特性を駆使しており、光でなくては実現しない超高性能顕微鏡といえよう。今後、光学の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。したがって、光の本質をさらに詳しく研究する必要性が増大するであろう。とくに、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ろう。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、光集積回路、などがあるが、これらの要素の開発のいくつ

かはわが国が世界をリードしている。PSTM および関連する研究分野は若々しく、魅力的であり、広範な科学技術分野への波及効果があるといえよう。

なお、表 1 については筆者らの調査不足により必ずしも十分公平な値を示していない不安も残る。不備な点をご指摘いただければ幸いである。

研究開始当初に貴重なご助言を賜った計量研究所の山田啓文博士、技術討論をいたいたいた（株）ニコンの藤井透氏、鈴木正敏氏、大沢日佐雄氏、浅見武史氏、藤倉電線（株）の宮本末広氏、さらに生体動力学に関しご指導いただいた本学の猪飼篤教授、システム構成についてご議論いただいた中川賢一博士を始めとする筆者らの研究グループ諸氏に感謝します。

文 献

- 1) 矢部 明、谷口彬雄、増原 宏、松田宏雄：“有機超薄膜入門”（培風館、東京、1989）。
- 2) Y. Kuk and P. J. Silverman: “Scanning tunneling microscope instrumentation,” Rev. Sci. Instrum., **60**(2) (1989) 165-180.
- 3) D. Rugar and P. Hansma: “Atomic force microscopy,” Phys. Today, Oct. (1990) 23-30.
- 4) L. J. Cutrona, Emmett N. Leith, L. J. Porcello and W. E. Vivian: “On the application of coherent optical processing techniques to synthetic-aperture radar,” Proc. IEEE, **54** (1966) 1026.
- 5) E. A. Ash and G. Nichols: “Super resolution aperture scanning microscope,” Nature, **237** (1972) 510-512.
- 6) U. C. Fischer, U. T. Durig and D. W. Pohl: “Near-field optical scanning microscopy in reflection,” Appl. Phys. Lett., **52** (1988) 249-251.
- 7) U. Durig, D. W. Pohl and F. Rohner: “Near-field optical-scanning microscopy,” J. Appl. Phys., **59** (1986) 3318-3324.
- 8) R. C. Reddick, R. J. Warmack and T. L. Ferrell: “New form of scanning optical microscopy,” Phys. Rev. B, **39** (1989) 767-770.
- 9) E. Betzig, M. Isaacson and A. Lewis: “Collection mode near-field scanning optical microscopy,” Appl. Phys. Lett., **51** (1987) 2088-2090.
- 10) D. Courjon and J. M. Vigoureux: “External and internal reflection near field microscopy: experiments and results,” Appl. Opt., **29** (1990) 3734-3740.
- 11) J. M. Guerra: “Photon tunneling microscopy,” Appl. Opt., **29** (1990) 3741-3752.
- 12) 岡本隆之、山口一郎: “表面プラズモン顕微鏡”, 光学, **19** (1990) 682-686.
- 13) 蒋 曙東、富田直幸、中川賢一、大津元一: “フォトン STM—設計と解析”, 平成1年秋応物予稿集, 30 p-ZE-4/III (1989) p. 949.
- 14) 富田直幸、蒋 曙東、中川賢一、大津元一: “フォトン STM (III) (IV)”, 平成2年秋応物予稿集, 28 p-B-7/II, 28 p-B-8/II (1990) p. 420.
- 15) 蒋 曙東、富田直幸、中川賢一、大津元一: “半導体レーザーを用いたフォトン STM の基礎研究”, 第4回光波センシング技術研究会講演論文集 (1989) pp. 53-59.

- 16) P. F. Marella and R. F. Pease: "Comment on" writing nanometer-scale symbols in gold using the scanning tunneling microscope," *Appl. Phys. Lett.*, **55** (1989) 2366-2367.
- 17) M. Fee, S. Chu and T. W. Hansch: "Scanning electro magnetic transmission line microscope with sub-wavelength resolution," *Opt. Commun.*, **69** (1989) 219-224.
- 18) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics*, 1st ed. (Mcgraw-Hill, New York, 1968) Chap. 2.
- 19) O. Bryngdahl: "Evanescent waves in optical imaging," *Progress in Optics*, ed. E. Wolf, Vol. XI (Elsevier Scientific Publ., 1973) pp. 169-184.
- 20) C. H. Shin and M. Ohtsu: "Stable semiconductor laser with a 7-Hz linewidth by an optical-electrical double-feedback technique," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 1455-1457.
- 21) C. H. Shin and M. Ohtsu: "Heterodyne optical phase-locked loop by confocal Fabry-Perot cavity coupled AlGaAs laser," *Photon. Technol. Lett.*, **2** (1990) 297-300.
- 22) D. Hils and J. L. Hall: "Ultra-stable cavity-stabilized lasers with subhertz linewidth," *Proc. of Frequency Standards and Metrology*, ed. A. De Machi (1988) pp. 162-173.
- 23) J. L. Jewell, A. Scherer, S. L. McCall and Y. H. Lee: "Low threshold electrically-pumped vertical-cavity surface-emitting micro-laser," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 1123-1124.
- 24) F. De Martini, G. Innocenti, G. R. Jacobovitz and P. Mataloni: "Anomalous spontaneous emission time in a microscopic optical cavity," *Phys. Rev. Lett.*, **59** (1987) 2955-2958.
- 25) J. Stone and L. W. Stulz: "Pigtailed high-finesse tunable fiber Fabry-Perot interferometers with large, medium and small free spectralranges," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 781-782.
- 26) S. Jiang and N. Tomita: "Proposal of super-sensitive reflection-mode phase locked PSTM by diode laser," *OEC '90, Tech. Dig.*, Makuhari Messe Japan, 12D1-3 (1990).
- 27) M. Ohtsu, K. Nakagawa, S. Jiang and N. Tomita: Super-resolution photon scanning tunneling microscope," *OEC '90, Tech. Dig.*, Makuhari Messe Japan, 12D1-1 (1990).
- 28) K. Tanaka, A. Ikai and K. Kameyama: "Proteasomes(multi-protease-complexes) as 20 S ring-shaped particles in a variety of eukaryotic cells," *J. Biol. Chem.*, **263** (1988) 16209-16217.
- 29) D. M. Eigler and E. K. Schweizer: "Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope," *Nature*, **344** (1990) 525-526.
- 30) 大津元一, 蔣 曙東, 富田直幸, 中川賢一, 藤江嘉彦: "フォトン STM(v)一單一原子レベル結晶成長", 平成2年秋応物予稿集, 27-a-L-9/III (1990) p. 800.
- 31) D. Sesko, C. G. Fan and C. E. Wieman: "Production of a cold atomic vapor using diode-laser cooling," *J. Opt. Soc. Am., B*, **5** (1988) 1225-1227.
- 32) A. Aspect and E. Arimondo: "Lasercooling below the one-photon recoil energy by velocity-selective coherent population trapping," *Phys. Rev. Lett.*, **61** (1988) 826-829.
- 33) M. A. Kasevich, D. Weiss and S. Chu: "Normal-incidence reflection of slow atoms from an optical evanescent wave," *Opt. Lett.*, **15** (1990) pp. 607-609.
- 34) 納谷敬宏, 塚越幹郎: "レーザーによる細胞プロセシング", 応用物理, **57** (1988) 1035-1040.
- 35) M. Fukuma, I. Ogasawara, A. Nishimura and S. Suzuki: "Characterization of cross-talk in four-core graded-index multicore fiber," *OFC/IOOC '87/WEDNESDAY AFTERNOON* (1987) w17, p. 172.
- 36) 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, 東京, 1987) pp. 182-202.