

光で見えないものを光で見る、 あやつる、加工する

東京工業大学大学院
総合理工学研究科・教授 大津 元一



東京工業大学の天津でございます。どうぞよろしくお願いたします。

伊賀先生のお話は、非常に豊かな発想に基づきまして着実なご努力をなされた結果、産業界の大きな分野を開かれた業績のご紹介でしたが、これからの私の話は、まだ技術の成長段階でいいますと、幼稚園から小学校1年生ぐらいのところになったかなという話ですので、まだ不確かなところもありますが、将来もあるだろうということで、気楽にお聞きになってくだされば結構です。

「光で見えないものを光で見る、あやつる、加工する」というタイトルは、実は伊賀先生の先ほどのお話とあわせてご説明しますと、広がったり集まろうとする性質を持つ光を使ったのでは見えないような非常に小さいものを、別の種類の光を使って見たり、あやつったり、加工することはできないかというお話です。

話の筋としては、まず導入のお話と、それから簡単な原理的なお話、それから新しいタイプの光を発生させるためのプローブ——というのはガラスの針のことですが、そんなものを作る話、それからこういうものが出来た暁に、実際に見たり、分析する話、それから、話の都合上、タイトルの順序とは逆にさせていただきますけれども、その小さな光を使って物質を加工するという話です。一例として従来の光ディスクに比べて、1,000倍ぐらいの多くの情報を記録できるような、光メモリを加工するという話です。それから次は小さい光を使って物質の基本的な

構成要素である原子をあやつる話をしてみようと思っております。

申し遅れましたけれども、私は東京工業大学で教えておりますが、同時にこういった研究は、財団法人の神奈川科学技術アカデミーで、ここ何年間かやらせていただいております。それも含めたご紹介ということをしていただければと思っております。

まず、それでは原理的なお話をします。

最初は、伊賀先生がお話しになったことの復習になります。まず、いままでのお話で出てきた光というのは、要するに広がるものです。光は電波の親戚ですけれども、たとえばレーザーから出てきた光は、広がって遠くまで飛んで行きます。それはものすごいスピードで飛んで行くわけです。それですから、光の通信とか、光の情報処理とかいうことができるわけです。

この光を集めるには、ある直径を持つ凸レンズを持ってきて、その中に光を通します。並行な光は凸レンズを通すと、焦点のところに点状に集まります。点光源の場合にもある程度集まるわけですが、しかし、波は広がるという性質を持ちますので、レンズで集めようと思っても、実際には点にはならず、若干ぼけが生ずるわけです。

ぼけの大きさがどのくらいかという、空間的に振動しながら飛んで行くときの1周期の長さ、——これは光の波長といっているわけですが、その光の波長程度です。本当は点になると思ったのが、もともと光が広がるという性質があるために、レンズで集めて

も、光の波長の大きさ程度の直径までしか小さくならないということです。

そういうことが起こると、往々にして悪いことがあるんですけども、たとえば図1に示すように、ここに隣接して2つの光源があったとします。この距離は非常に近い。そこから出てくる光をレンズで集めて、たとえばここに仮に点が出来れば、この光源の間隔ぐらいのところだけ離れた点が生じますね。だから、この点が2つあるということを見て、ここには光源が2つあるということがわかります。しかし、もとの1個の光源から出てくる光が、ここで光の波長程度のほけを生じますと、特にこの2つの光源の間隔が光の波長以下ですと、光の波長程度広がった点が、1つあるのか2つあるのかわからなくなります。ということは、逆に、ここに光源がもともと1つあるのか、2つあるのかわからないということになります。

これは何を言っているかという、こういうレンズで小さいものを見ようとする、ここに小さいものが光の波長程度、またそれ以下の間隔離れて置かれていたときに、その2つの物体を区別することができないということです。言い換えてみますと、たとえばこれを顕微鏡として考えますと、顕微鏡で見ることのできる最小の寸法は、光の波長程度であるということになります。

この原因はどこにあるかという、もともと光というのは遠くまで伝搬していくとともに、広がろうとする性質を持つ。ですから、いくらレンズで集めようとしても広がろうとする性質が残って、その大きさが光の波長程度だということです。

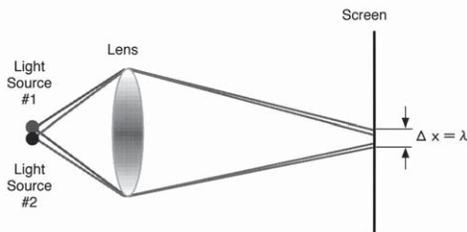


図1 レンズで集光したときの像のほけ Δx
 λ は光源からの光の波長。

よく、「壁に耳あり障子に目あり」というようなことわざがありますけれども、この話は、光だけではなくて、一般に波について言えることです。音は音波で、光とはちょっと違いますけど、それは波に違いないですね。ですから、壁に耳ありというのは、壁に必ずしも耳をつけなくても、壁の向う側の人の話し声はどこかに隙間があれば、その音が回って、隙間を出たあとと広がろうとするので、仮に後ろにいても聞こえるということを行っていますので、音でも広がろうとする性質を持つということから来ることわざ、というふうに言うことができます。もちろん壁に耳をつけなければ、その壁を通じて音が聞こえるわけですが、必ずしも壁に耳をつけなくても、壁の後ろ側にちょっと隠れていても、音は壁を回って広がろうとする性質を持つので、聞こえるということです。

翻って光に関して考えてみますと、光が広がろうとする性質を持ちますと、あまり小さいものを見たり、加工することができなくなります。たとえばレーザーの光をレンズで集めて、半導体の板を持ってきて、これを熱すると穴があきます。穴があくといいても、その穴の大きさは光の波長程度ですので、光の波長程度より小さい穴をあけることはできないということです。

一方、レーザーというのは光を閉じ込める箱でありまして、その中に光の波を閉じ込めなくてはいけません。あまり小さい箱を用意して閉じ込めようすると、光は広がろうとする性質がありますので、反発して広がってしまって、小さい箱の中にはちっとも光が閉じ込められないことになります。つまり、あまりレーザーの寸法を波長よりも小さくすると、レーザーの装置はできなくなるということです。ということなので、レーザーをたくさん並べた光の集積回路などの最小寸法は、やはり光の波長程度以下になりません。

皆さんご存じのように、電子の動きを使ったトランジスタ、それを集積化した集積回路というものがありますね。LSIといってい

まして、最近はその上にUというのをつけて、ウルトラLSIとっていますが、あれはものすごく小さくなってきていまして、原子数個分または数十個分ぐらいの寸法の構造の加工によって作ったようなデバイスになっているわけです。最近では、原子を1個1個つかむとかいうような加工技術も出てきておりまして、物質は非常に小さいんですけども、それに対して光というのは、今いきましたように、波長程度以下の寸法のところには閉じ込めることができないほど大きいということです。

ということで、世の中は高度情報化社会、それから高度福祉社会になってきておりますので、光を使った通信などで多量で多様な情報を送ろうとすると、光の波長程度の大きさのデバイスでは追いつかなくなる時代が、わりと早くやってくるかもしれません。すなわち光の波長以下には光は小さく閉じ込められないので、早晚、光技術の限界がやってきます。

しかし、本日のこれからのお話は、実際には必ずしもそういうデッドロックにはのり上げないかもしれないという内容です。

それにはどういうことをすればいいかということですが、それは広がろうとする光以外の光を使えばよろしい。いろいろ探してみますと、そういう光が実はあります。

それは近接場の光といいます。図2に示しますように光の波長に比べてずいぶん小さい直径を持つ微粒子があったとします。これに光を当てます。この光はこの微粒子が小さい

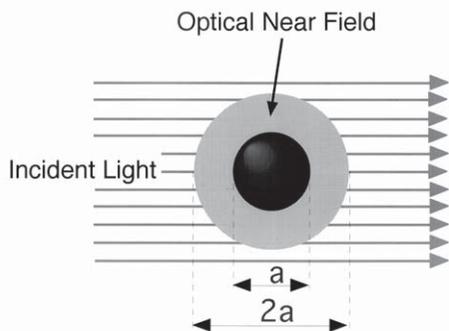


図2 直径aの微粒子の表面に発生する近接場の光の寸法

ために、ほとんど気がつかないで、通り抜けて行ってしまいます。しかしこの微粒子の表面を注意深く見てみますと、光がじわじわと染み出していまして、その光の染み出しの厚みが、この微粒子の直径程度です。それからこの光は、微粒子の周りをぐるぐる回っている表面波のようなもので、遠くへは飛んで行きません。これが物質の表面に近接したところにある光の場なので、近接場の光といっております。

これは先ほど言いましたように、遠くまで飛んで行かないで、この物質の周りに染み出していますので、広がる光、集まる光ではなく、染み出しているだけで飛んで行かない光です。

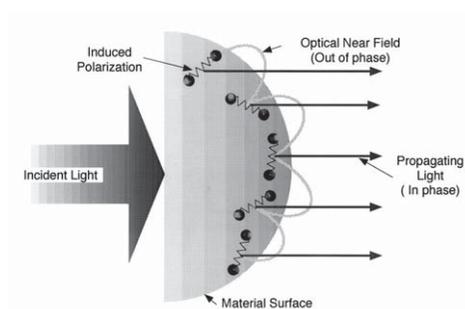


図3 近接場の光の発生の機構の説明

何でこんな光が出るのかというのを簡単に説明しますと、図3のようになります。左から光が入ってきまして、微粒子に当たります。微粒子というのは、電子とか原子がいっぱい詰まったものです。ここに光が入ると、この中の原子の周りを回っている電子が振動を始めまして、非常に小さなアンテナが出来るようになります。言ってみれば、これは原子のアンテナです。原子のある場所によって出来るアンテナの方向がいろいろ違いますので、そのアンテナから発する電波、すなわち光の出方が原子ごとに少しずつ違います。光は波ですので、原子のアンテナから出てくる光の振動は位相が少しずれています。そのうちの位相の合った成分は、互いに足し合わさって遠くまで飛んで行きます。これが入っ

てきた光があたかも通り抜けて出てきたことになっているわけで、これが実は従来の光です。

それ以外に、互いに隣同士位相がずれていると、出てくる光が弱め合ったりするような、干渉という効果により、すぐ消えていってしまうわけです。言ってみれば、この物質の表面だけに先ほどの干渉の縞々みたいなものが出る。いわゆるアンテナ同士が互いに干渉し合って、やがて消えてしまうような、ささやかな光がここに出てきます。これが先ほどの、染み出して遠くに飛んで行かない光、つまり近接場の光です。

これが発生する光近接場の実態と考えられるわけですが、実はいままでの説明の中に、光の波長ということばは全然出てきませんでした。光の波長がどうであろうと、こういう光の膜といいますか、近接場の光が存在するわけです。だから、この微粒子の直径を小さくして、その周りにこんな非常にささやかな光を出させ、この光をペンライトのように使うことができれば、その物質が仮に光の波長に比べて小さい寸法を持っていたとしても、このペンライトの光を物質に当てまして、照明すれば、それを見ることが出来ます。それからこの小さな光の膜を半導体の板に持って行って、そこを加熱すると、そこに光の波長よりずっと小さい穴があきます。しかし実際には問題があります。この光は遠くまで飛んで行きませんので、見えないわけです。見えなければ利用ができません。まず、見るためにはどうしたらいいか。

そのためには、たとえばこの微粒子に光を当てたときに光近接場が出来たとしますと、その光を測定するために、図4(a)に示すようにもう1つの微粒子を持ってきます。その微粒子で先ほどの光の膜を散乱させるわけです。要するに微粒子を光の膜の中に突っ込み、その微粒子で先ほどの光の膜を散らせるわけです。散ったあとは、もうこれは普通の遠くまで飛んで行く光になりますので、遠くに目を置いていても見えます。このようにもう1

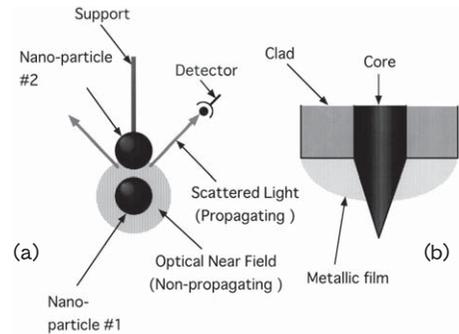


図4 プロブによる近接場の光の検出
(a) 原理図
(b) コア部を先鋭化し、根元を金属膜で覆ったガラスファイバによるプロブの断面図

個の微粒子が必要だということです。この微粒子を、プロブとっています。

では、どのくらいの大きさのプロブが必要かということ、一番よく光を散乱させるためには、この微粒子と同じ大きさの微粒子を持ってくるのが一番いいということがわかっています。たとえば1nm(ナノメートル)、すなわち波長の1,000分の1ぐらいの大きさの微粒子の周りに光の膜を発生させ、それを観測したり利用するには、1nmの大きさのもうひとつの微粒子を最初の微粒子の表面近く、1nm程度まで近づけないといけないということです。

ただ、1nmの微粒子を作るというのは、必ずしも容易ではありません。1nmという非常に小さくて、原子が約100個からなる物質です。ですから、このような光を利用するには、非常に小さな微粒子を加工して作るというような、材料工学の助けが必要になってきます。

実は、ここまで込み入ったようなメカニズムに関してのお話ではありませんが、関連する素朴な提案が1928年に出ているんですね。イギリスのシンゲという人が物理学の雑誌に書いておられますが、その論文を見ていると非常に面白くて、英語そのものが日本でいうと古文みたいな感じで、われわれが高校で習ったような英語とはちょっと違う文法に基づいて書いてあります。よく読んでみると、「私

はこのような論文を書く気はしなかった。しかしながら、ボスがこういうものを書いて、特許を書いて発表しておく、のちのちにいいことがあるかもしれない、というので書きました」ということを書いてあります。確かにその頃は、小さいものを作るということではできなかったものですから、こういうものを提案しても荒唐無稽だったと思います。

けれども、科学の長い歴史の中では、そういうものを実現するような技術の研究も進んでいまして、最近になってそういった研究を実現するための周辺技術がかたまってきたので、1980年代の中頃に、ほぼ4つの研究グループで初めて実験が成功しました。それはIBMのスイスのチューリッヒの研究所、アメリカのコーネル大学、それからアメリカのオークリッジ国立研究所、それからわれわれの東京工業大学です。

それからもう1つ面白いのは、有名なインシュタインが友達に宛てた手紙の中に、シンゲと同様のアイデアも書いているということです。

さて、実際にはどのようにして加工するかということですが、微粒子を、宙に浮かすということもできませんので、何らかの支えが必要で、したがって、現代の宝石といわれる非常に純粋度の高いガラスのファイバーを加工して作ります。

ガラスのファイバーというのは、中心部にゲルマニウムなどの原子が入って、屈折率が高い部分をもち、これをコアといいます。周りにはクラッドといい、コアを支えるものがあります。光はこのコアの中を伝搬してきます。

これを図4 (b) に示すように針のように尖らせまして、根元に不透明な金属膜を塗ります。そうすると先端だけが透明で飛び出します。この部分を微粒子として使うわけです。この非常に小さい先端で近接場の光を散乱させるわけです。散乱させたらファイバーの中を通して、ファイバーの後端にある光検出器で測定します。

なぜ、1980年の中頃になって、実験がう

まくいくようになったかということ、特に日本のファイバーメーカーの技術力の高さによって、ガラスファイバーが、非常に性能よく出来るようになりまして、かつこれを熱で溶かしたり、それから最近では酸で溶かして尖らすという技術が非常に進みまして、先端の曲率半径が非常に小さくなるようなものが出るようになりました。

それ以外に、IBMのチューリッヒ研究所がその当時ノーベル賞を取った、電子顕微鏡の非常に倍率の高い走査型トンネルプローブ顕微鏡というものがあるんですが、そういうような技術を使えるようになりました。それまでの約60年間は、ほとんど空白の時代でした。

図5はわれわれのところでもうまくいった、ガラスファイバーを尖らした結果の写真です。ガラスファイバーの周りのクラッドの中心にコアが尖っています。これはフッ酸で溶かし出したものです。この先端部分が少し暗いですが、拡大すると先端曲率直径、先ほどの微粒子に対応するものの直径ですけれども、それは30Å未満。原子が20~30個ぐらいしかくっついていないような状態になっています。次に金属膜を根元に塗りまして、円錐状のものを飛び出させます。円錐状のもの寸法が30nmくらいですから、光の波長の20分の1ぐらいの大きさになっています。もちろん、この先端部分は光の波長の1,000分の1程度の大きさになっています。こういうものを使うと、先ほど言ったような光の膜を使って見る、加工する、あやつるということが出来ます。

最近ではガラスファイバーを、ただ尖らして鋭くするだけではなくて、出入りする光の量が多くなるように、尖っている部分の長さを短くしたり、それから先端に色素や半導体の微粒子などをつけて、違う色の光を出したり、いろいろな機能をするプローブが出来るようになってきています。

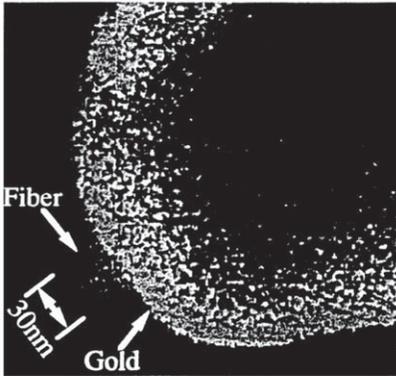
それからもう1つ申し上げたほうがいいと思われるのは、図4 (a) はあくまでも原理的な説明でして、両者の微粒子の役割を逆にす



先鋭化ファイバー



先端部の拡大図



根本に金属膜を蒸着後

図5 ファイバープローブの電子顕微鏡写真

することもできます。すなわちガラスのファイバーの後端から光を入れますと、先端部分に非常に小さな近接場の光が染み出します。それをもととは測定対象である微粒子で散乱させるということもできます。ですから、こちらの下の微粒子の周りの光をプローブで散乱させるか、ファイバーから出てきた近接場の光を微粒子で散乱させるか、どちらかを使

います。どちらの方法を使うかは、応用の内容によるわけです。

それでは、見る、分析するというお話から始めさせていただきます。

まず、見るということですが、先ほどの2通りのやり方があるんですが、1つはガラスファイバーを近接場の光のある位置に固定します。そして散乱される光のパワーを測定します。その測定値をグラフ用紙の縦軸のところに書いておくわけです。横軸はこの針の位置です。次に、この針をちょっと動かして、やはり次のパワーの値を測定します。そして、グラフ用紙の横軸の隣の点に、この測定値を書きます。これを繰り返して針をずっと動かしながら、針の各位置のところで光のパワーの測定値をグラフで書いていきます。実際には針を一次元上に動かすわけではなくて、奥行き方向にも動かして、二次元の地図の上に光のパワーの測定値を書いていくわけです。それは何を表しているかということ、近接場の光の各場所でのパワーの大きさを表していることにほかなりません。ということは、この微粒子の寸法、形状を測定していることになります。

これは微粒子の形を見るための装置、いわゆる顕微鏡を作っていることにほかなりません。これを近接場光学顕微鏡といっているわけです。

具体的にそんなようなやり方でものの形を見た例を、これからいくつかご覧に入れます。

その装置では、ガラスのファイバーをもちろんで動かすわけにもいきませんし、それから装置をコンパクトに作りませんと、周りの温度が1度変わると、たとえばアルミニウムの板などは $1\mu\text{m}$ ぐらい簡単に伸び縮みしてしまいますから、きれいな像が見えません。ですから、お茶筒のような容器の中に収めて、ひっくり返しても壊れないような装置を注意して作るわけです。

たとえば図6は、サファイアの非常に平坦な板を見たものです。平坦な板でも、ところどころ原子の数でいうと、1層とか2層ぐら

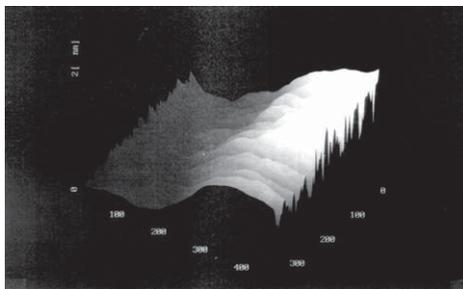


図6 超平坦サファイア基板上の原子層ステップの測定結果

いのステップがあります。サファイアというのは透明ですから、後ろから光を当てて、先ほどの近接場の光をサファイアの板の上に発生させます。そこにプローブを近づけていって、サファイアの板の面に沿わせて動かしながら、測定される光のパワーを図示したものです。縦軸のこの高さが 10\AA ぐらいです。ですから、原子でいうと2層分ぐらいの段差があるということ、光の波長の1,000分の1ぐらいの厚みがかれるように出来ているということです。

それ以外に、誘電体のリチウムナイオベートと称する結晶を、特別な方法で先ほどのサファイアの板の面の上に一辺 20nm ぐらいの微粒子として作ります。それに光を当て、出てくる近接場の光をファイバーで拾い出すと、図7のように小さい結晶の像が見えます。こ

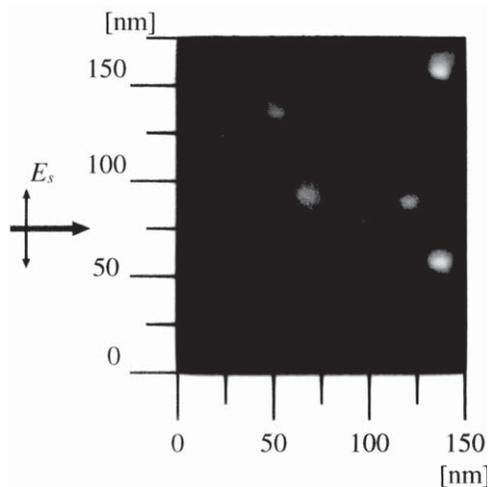


図7 リチウムナイオベートの微粒子の測定結果

の図では光の波長の4分の1×4分の1ぐらいの視野を見てるわけです。普通の顕微鏡ですと、先ほど凸レンズで焦点面上に光を集めたときの光のぼけのために、このような小さい視野の中には像があるのかないのかわかりません。しかし、このようなプローブをうまく使いますと、こういうふうに結晶の微粒子が見えます。

これは要するに顕微鏡なわけですが、顕微鏡の大きなマーケットは、生物とか医学とか、そちらのほうの生体試料を見るような分野です。図8は直径がだいたい 20 から 30nm ぐらいのバクテリアの鞭毛と称する小さなひげを、ガラスの基板の上に固定しまして、空気中で見たものです。この変な黄色いものがその鞭毛の末端の部分で、直径はだいたい 30nm ですから、光の波長の20分の1から30分の1ぐらいの値です。

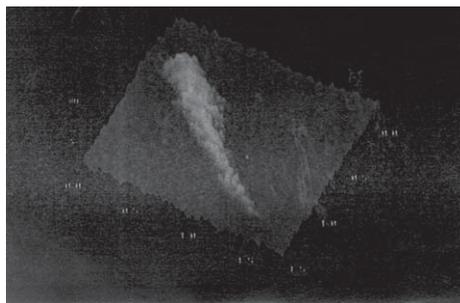


図8 バクテリアの鞭毛の空気中での測定結果

これはもちろん、従来は光では見えませんでした。どうしていたかという、電子顕微鏡を使って見ていたわけですね。すなわちガラスなどの基板の上にこのひげを置き、金属膜を塗り、それを真空装置の中に入れて、電子のビームを当てて見たということです。ですから、電子顕微鏡ですと、生体試料そのものを殺して見ているということになります。しかし、光の場合には空気中で、この程度の大きさまで、この顕微鏡で見えるということです。

ただ、実際には生物試料というのは、溶液中で生きていますので、溶液中で見る必要があります。電子顕微鏡では溶液中の試料とい

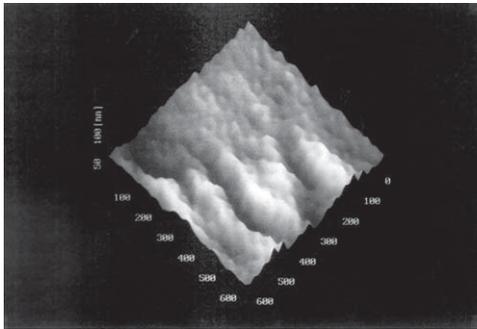


図9 バクテリアの鞭毛の水中での測定結果

うのは見えません。ここでは先ほどの鞭毛をガラスの上に載せて、それを水の中に入れます。水の中にガラスのファイバーを浸けて、この鞭毛の下から光を当てたときに発生する近接場の光を見ています。図9は互いに近接する5本のひげが見えた例です。これもだいたい、30から太いところで50nmぐらいの寸法のもが見えます。

見るということに関してはきりがありません。たとえば神経細胞の本体から出ている軸索と称するパイプの中にマイクロチューブリンと称する細いひものような束がいっぱい詰まっています。このマイクロチューブリンと称するひもの直径は、電子顕微鏡で見たときは25nmぐらいといわれています。これを電子顕微鏡で見るためには、このパイプの軸索を切り、中からマイクロチューブリンの束を出し、そのうち1本を板の上に載せて、金属膜を塗って、真空の中に入れなくてはなりません。

しかし、光の場合には、実はこの軸索が半透明ですので、プローブをこの軸索の外側に這わせると、中の模様が見えます。ですから軸索を切って中身を出さずに見ることができる、というのがプローブを使った方法の特長です。

実際に見た1本のマイクロチューブリンの直径が25~26nmぐらいです。つまり電子顕微鏡で見たのと同じぐらいのものが、軸索のパイプを切ることなく見えるということです。

いまの段階でどのぐらいの小さいものまで見えるかといいますと、代表的になっていきますわれわれの例ですと、8 Åぐらいのものまででしたら見えます。ですから光の波長の1,000分の1ぐらいのものが見えるようになってきているということです。

実は、光を使ってこんな小さいものを見ようとするときには、もちろん強いライバルとして電子顕微鏡などがあります。しかし、光には電子顕微鏡ではできない機能がありまして、それは分析するという事です。最近の動きは、見るだけではなくて、非常に小さいものの構造を分析ということが加わっておりますので、この後は、先ほどの近接場の光を使った大きな応用として、分析する話をご紹介しますので、ぜひとも聞いてほしいと思います。

たとえば、当てる光の波長を変えていきます。ここで、どの波長の光を当てたときに、相手の微粒子はその光をどのくらい強く吸収するか、またはどの波長の光を当てたときに、その微粒子はどんな色の光を発生するかということを調べますと、微粒子の内部構造がわかるということです。内部には電子とか原子が詰まっていますので、たとえば原子や電子がどんな振る舞いをしているかということがわかります。

代表的な例を1つだけご覧に入れることにしますが、最近はやってきています半導体の量子ドットというものの構造の分析です。

半導体の量子ドットというのは、半導体の小さな粒と想像していただければ結構です。たとえば半導体の板の上に、結晶成長の最先端技術を使って非常に小さな半導体の微粒子をたくさん並べます。この微粒子の寸法は中に入っている電子の動きを束縛してしまうほど小さいので、電子はもはや自由に動き回れません。すると電子はどんなエネルギーも好き勝手に取り得るのではなくて、特別な値しか取り得なくなり、電子のエネルギーが離散化します。

これに赤い光を当てると、この電子が活性化しまして、この中に閉じ込められながら、

近赤外の光を出します。ですから、出てきた近赤外の光を使うと、このような小さい微粒子をいっぱい集めて、効率の高いレーザが出来るといわれています。

各々のドットからは、非常に単色性の高い強い光が出てくるといわれています。しかし現在の技術は、1個1個のドットを規則的に同じ大きさで、同じ構造で作ることが難しく、やはりばらついています。このばらつきをなくして、より高い精度で、ばらつきの少ないドットを作っていくにはどうしたらいいか、という設計指針を得るためには、まず、このドット1個1個から出てくる光のスペクトルの特性を正確にはかって、そのばらつきの原因がどこにあるかというのを知って、最適な材料の製作を設計することが重要です。

しかし、従来は多数のドットに、レンズを使って赤い光を当てて、それで近赤外の光を出して、それをレンズで集めていました。この場合、赤い光の像のぼけが1 μm ぐらいあります。そうしますと、その1 μm ぐらいのぼけの中に、ドットはだいたい100個とか200個ぐらい入ってしまいます。ですから、1個のドットだけからの近赤外の光を測定しようとしても、それは無理なわけですね。ですから、多数のドットのスペクトルの包絡線が測定されるにすぎません。しかし、この1個のドットからのスペクトルだけをほかりたい。そのためには、1個のドットに光を選択的に与えられればよろしい。そのためにはプローブの後端から赤い光を入れて、先端の鋭いところに近接場の光を染み出させて、それを1個のドットに近づけて、1個のドットだけを活性化して、そこから出てくる近赤外の光を測定することが必要でしょう。

もちろん、電子顕微鏡は、こういう目的には使えませんが、近接場の光を使ったようなやり方ではうまくいきます。

最近、半導体レーザの材料のインジウム・ガリウム・砒素という化合物半導体の、直径30nm、高さが15nmぐらいの量子ドットが作れるようになってきました。それはガリ

ウム砒素の基板の上の、だいたい1 μm \times 1 μm の面積内に200個ぐらいの密度で作られています。実際には、並べられたドットの上にガリウム砒素や、アルミニウム・ガリウム砒素などの保護層を置いています。ですから、このドットというのは地下深く埋蔵されたものなわけですね。ですから上からは平らに見えて、このドットがあるかどうかはわかりません。しかし図10に示すように、このプローブから出てくる近接場光でこのドットを基板を通して照明すると、電子の活性化によって生ずる近赤外の光が出てきます。当てる光は赤い光で波長が0.6 μm 、出てくる光の波長は0.8~0.9 μm です。そのスペクトルを見ようというものです。

もう1つの問題は、普通はこのドット1個からの近赤外の光は弱いので、こういった測定は試料を液体ヘリウム温度、すなわち絶対5~10度程度の極低温にまで冷却して近赤外の光の発生効率を増加させる必要があります。それから実際には、プローブを通して光を当てても、この保護層のところで電子が活性化されて、その電子がいろいろ動き回ります。そうすると、たとえば保護層のある位置で活性化された電子が、ずっと遠くまで行って、遠方のドットを活性化したりすることもあるわけです。それなので、必ずしもある位置で光を局所的に照射しても、逆に遠くの方から近赤外の光が出てくる場合があります。

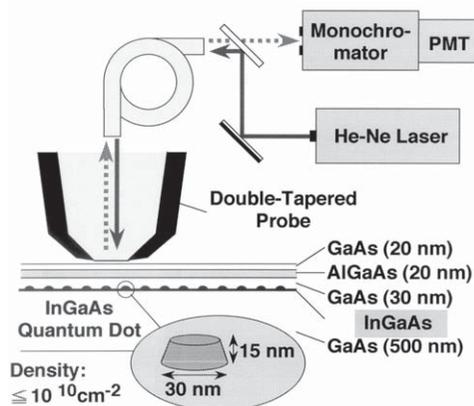


図10 InGaAs半導体の量子ドットおよび試料の構造とフォトルミネッセンス測定装置の説明

その光を全部集めてしまうと、1個1個のドットからの光を受けることにはなりません。そこで近赤外の光もこのファイバーの針を通して受けて検出します。すなわちプローブの先端から出てきた赤い光でドットを活性化して、ドットから出てきた近赤外の光を、もう1回プローブで集めて検出するというような、そういった効率の悪いことをせざるを得ません。けれども、プローブが適当な形をしていますと、首尾よく検出できます。

実際に極低温で測定してみますと、従来ですと図11の上部の曲線のような、数多くのドットからの発光スペクトルの包絡線しか見えなかったのですが、ここでは下部の曲線のように1本1本のスペクトルが見えるようになりました。

ドットは半導体ですので、電子が活性化され伝導帯と称するエネルギー準位に上がりますと、価電子帯と称するエネルギーの準位の中に、正孔と称する正の電荷を持つような擬似粒子が発生します。あるときに負の電荷を持つ電子が正の電荷を持つ正孔とくっつきますと、エネルギーを失って、そのかわりそのエネルギーが光となって出ます。実際にわれ

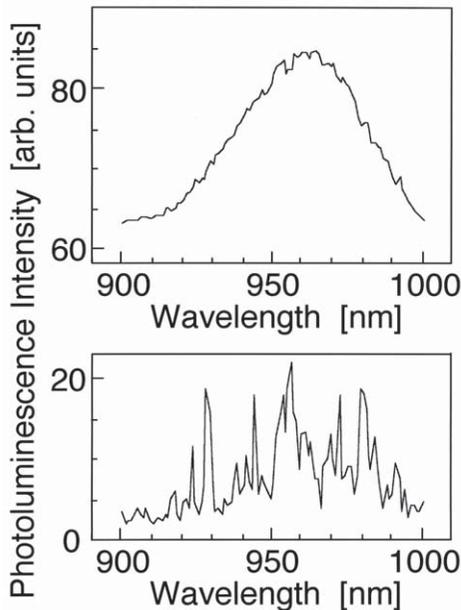


図11 量子ドットのリソグラフィーによるフォトルミネッセンスのスペクトルの測定結果（上図：従来方法による下図：近接場の光による）

われは、この光を近赤外の光として見ているわけです。この電子と正孔のペアのことを励起子（エキシトン）という言い方をしていますが、この励起子が発光するのが、先ほどの近赤外の光です。

それから、同時に電子と正孔が2組ペアになる場合があります。これは励起子分子とよべられます。これは水素の原子核と電子が組み合わせられて出来る水素原子が2つ結合して水素分子を作るようなものです。

こういった水素分子状の励起子分子も光を出します。2つの励起子がペアをつくることによる結合エネルギー分だけ低いエネルギーの光が出ますので、実際には1個の励起子から出てくる光よりも、波長が少し長い光を出します。これをバイエキシトンといっているんですが、バイエキシトンのこのような励起子分子のスペクトルも見ることができると、ドットの中に電子と正孔のペアが1組あるものが発光しているのか、水素分子状の2組あるものが発光しているのか、という構造分析ができます。

さらに付け加えると、励起子でも、特に電子が一番最低のエネルギーの値をとるのが一番安定なんですが、このエネルギー準位をとり得る電子が中にいっぱいになりますと、次の電子は上のエネルギーの値をとります。この上のエネルギーにいる電子が正孔と結合して出す光は、高いエネルギーを持っており、したがって、短い波長の光になります。ですから、こういう波長の短いスペクトルが出たら、この中には高いエネルギーの電子があることがわかります。

実際には、広い波長範囲にわたってスペクトルをはかります。その結果が図12です。それから、この図12のパラメータは、ドットに当てる赤い光のパワー密度の大きさです。このパワー密度を上げていくと、最初のエネルギーの低い電子の発光が弱くなったり、逆にそのあとエネルギーの高い電子からの発光が増えたりというようなことがあって、それぞれ当てる光のパワー密度に対して一番エネル

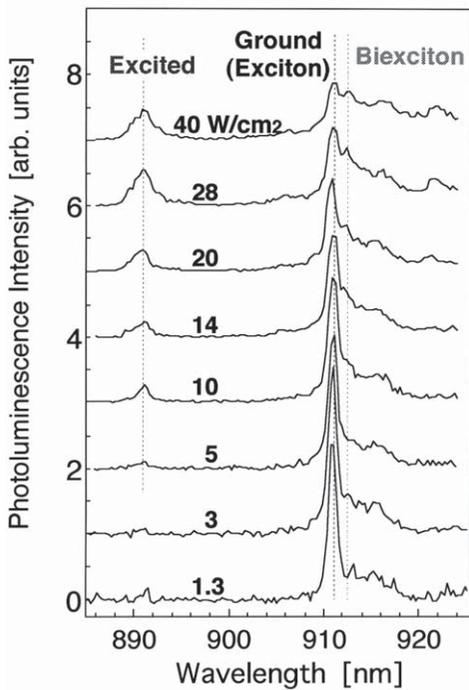


図12 照射する光のパワー密度をパラメータとした量子ドットのフォトルミネッセンスのスペクトルの測定結果

ギーの小さい電子が発光する強度、それから励起子分子が発光する強度、それから高いエネルギー準位の電子が発光する強度の振る舞いというのが違ってきます。このようなものを注意深く見ると、どのドットにどんなエネルギー状態の電子が含まれているかということがわかります。

たとえばいろんなドットから出てくる発光の強度を、当てる光のパワー密度をだんだん増やしながら調べますと、最終的には図13のような分類ができて、励起子分子の発光、最低次のエネルギーを持つ励起子の発光、それからエネルギーの高い準位を持つ励起子の発光というように、すべてのドットに対してどんなエネルギー状態の電子が含まれているかというのがわかるようになります。

次は、加工するという話に入ります。いままでは、見たり、分析したりする話でしたので、物質の構造を変えたりするような積極的なことはしませんでした。しかし、次のよう

なやり方で加工することができます。加工の例としては、光メモリをご覧に入れます。

原理は簡単です。ガラスファイバースコープの後端から光を当てますと、近接場の光がプローブの先に発生します。この近接場の光のパワーは、1 pW (ピコワット) ~ 1 μW (マイクロワット) ぐらいです。ですから、伊賀先生のmW (ミリワット) などのレーザーの光からすると、3桁から9桁ぐらい小さい値です。しかし、このプローブの寸法も非常に小さく、数ナノメートルですので、単位断面積当たりのパワーの大きさ、いわゆるパワー密度は、1平方cm当たりに換算すると、100W ~ 1 kW になります。そうしますと、ファイバースコープの先に強いエネルギー密度の光が出ますので、この光を適当な膜、材料、結晶の板に当てますと、そこだけが集中的に加熱される場合があります。場合によってはそこだけが光化学反応を起こしまして、構造が変わります。それを利用して、この光のエネルギーで板に穴をあけるか、または構造を変えて、この光の直径の大きさ程度の寸法のメモリ、ビットを表す点1個と記録することができます。

この点を書いたことが、光メモリの記録に対応します。レコード針による録音というこ

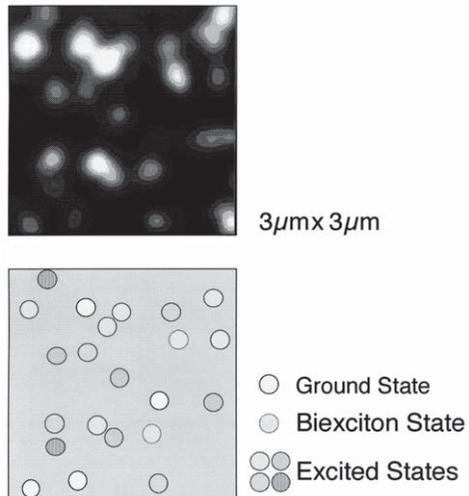


図13 各量子ドットから発光するフォトルミネッセンス像とその原因の帰属

とになります。再生は、もう少し弱い光を使って、この穴のあいたところや構造の変わったところを、顕微鏡として測定します。ここに穴や点があったということを知ると、これは記録の再生になるわけです。場合によっては、別の波長の光を入れますと、この穴を修復することができまして、メモリの消去ということになります。これを繰り返しますと、消去可能なメモリが出来ます。

このような原理の実験は、われわれのところですでに、ずいぶん前にうまくいってまして、たとえば有機材料の膜に、紫外線の光をファイバーを通して当てますと、図14のように直径が50nmぐらいの穴があきます。場合によっては、ファイバークローブを一直線上に走らせれば、線が描けたりする場合もあるわけです。

このような実験がきっかけになりまして、実は去年ぐらいから日本の国全体としても、こういった方法を使って、超高密度の光メモリを作る大型プロジェクトが進みつつあります。

なぜこんなことが採用されたかという、広がる光、集まる光を使って、従来の光メモリを作っていると、だいたい1平方インチ当たり1ギガビット程度の記録密度になります。しかし、光メモリの強大なライバルとして、磁気メモリ、ハードディスクメモリがありまして、その性能がどんどん上がってきますし、それを追いつくとして、広がる光、集まる光を使っても、レンズで集められるスポットの大きさというのは、光の波長程度しか

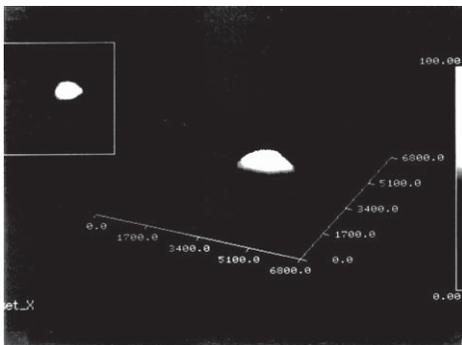


図14 有機薄膜に記録された直径50nmの円形スポットの像

ならないわけです。ですから、それよりも小さいものを加工してメモリを作ろうとしても、それは無理です。

けれども、われわれの場合には、原理的にはガラスのファイバーのプローブ程度の寸法まで小さな穴があきます。それは記録密度でいうと1平方インチ当たり1テラビットということになります。テラビットというのは1,000ギガビットということで、原理的には従来の光メモリの1,000倍の記録密度が得られるということです。

これはたとえば、動画像を1つのディスクの中に記録するとか、気象情報、医療情報、図書館1つ分ぐらいの文献情報を記録するとか、その程度の大きな容量を持っています。

そういうことで、将来の超高密度の光メモリの担い手の1つと言われて、図全体が応援をしてくださっているわけですが、ただし、1テラビットという値は大き過ぎるということが問題です。したがってプローブで書くというような原理実験から、皆さんが日常的に使えるようになるためには、越えなければならない大きな技術的問題があります。

たとえばどんな情報を提供するかによって、書き換え可能な必要があるのか、記録だけでいいのかという問題がありますし、それからプローブのかわりにどんなデバイスを作って記録したり、再生する必要があるのかとか、プレイヤーそのものの装置はどういうふうにしたらいいのか、記録される材料としてはいままでの材料でいいのかどうか、などが問題になってきます。

さらに、たとえば1nmのように小さいところに光を当てたときに、そこで熱が発生します。普通は熱というのは周りに拡散していくわけですが、その拡散というのが、そんな小さいところでは、従来の大きなものに熱を起こしたときの拡散の状態と同じなのかどうか、という非常に物理の細かいところにかかわるような問題も、解決されなければいけません。

とはいっても、実際にはこれらを1つ1つ

解決していく必要がありまして、そのうちのわかりやすいような例を1つだけ挙げますと、いま開発が進み始めているのは、再生スピードを上げるために、プローブを何本も用意しまして、同時に何本かのプローブで書かせたり、読み出させることです。

けれども、活け花の剣山を逆さにしたようなプローブの束を作ったとしても、プローブの高さにばらつきがあって、このばらつきを10nm以下ぐらいにすることは、現在のマイクロプロセスと称する半導体の加工技術では無理だろうと言われていています。ですから言ってみれば、ここではわれわれが開発したような、1個1個の細いプローブを束ねて使うことはやめるということです。

そのかわりシリコンの板に適当なエッチングで小さな穴をあけまして、穴の上から光を当てて、穴のところに出てくる近接場の光を使って記録したり再生するほうがよからうということが言われ始めています。

この穴はばらつきなく作れますし、その穴をたとえば100個×100個、アレイ状に作ることもできますし、それから裏の面が平らです。記録材料の上に非常に薄い潤滑剤を数ナノメートルぐらいの膜厚で塗りまして、その上にこれを滑らせると、精度よく適当なスピードで滑らせることができます。

図15は穴が2次元的にあいているシリコ

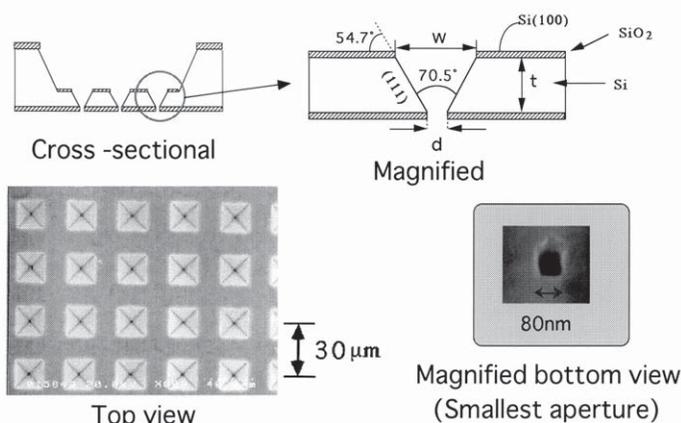


図15 シリコン結晶板に2次元的に穴の空いたプローブの構造と電子顕微鏡写真

ンの板で、その穴の1個を拡大すると、最小で80nmぐらいの四角い穴があいているものが出来ていることを表しています。

それから最近はさらに凝ったことができるようになってきていて、上から光を当てて、穴のところに発生する近接場の光のパワーを上げるために、凸部に1 μm程度の直径をもつボールレンズを1個1個埋め込みまして、上から入ってくる光がこの穴のところで焦点を結ぶようなものもできるようになってきています。

さて、最後に、あやつるという話をさせていただきたいと思います。

いままでの話は、見る、分析する、それから加工するということだったのですが、その寸法は、もちろん光の波長よりはるかに小さく、だいたいナノメートルぐらいの寸法の物質を扱っていました。しかし、ナノの下はオングストロームで、物質を構成する基本的な構成要素としての原子の寸法となるわけです。近接場の光というのは小さいですし、パワーも弱いんです。だけど、相手が原子ぐらいまで小さくなってくると、その原子をかなりいろんな自由度であやつることができるかもしれないという夢があるわけです。

ということで、いままでの話は、ナノの寸法のを扱うというような光エレクトロニクスでしたので、ナノフォトニクスとよぶこ

とにしますと、そのナノフォトニクスというのは画像計測だったり、分析だったり、メモリを作ったりするような加工だったりしたわけです。

もう1つ先に、アトムフォトニクスというのがあるのではないかと、ということです。それはたとえば真空中に浮いたり、飛行している原子を、近接場の光を使ってあやつるということです。

その原理は、図16のようになっています。すなわち近

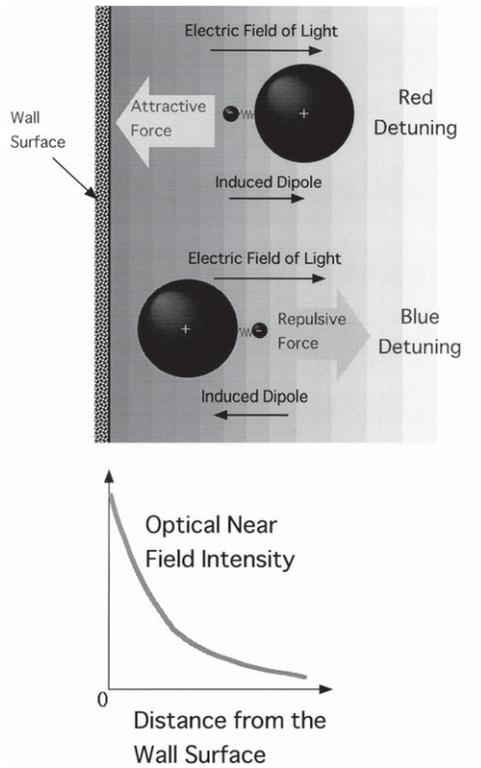


図16 近接場の光により発生する原子に対する双極子力の説明

接場の光を発生する物質の表面がここにあります。この図ではわかりやすいように表面が平面の場合について描いています。近接場の光のパワーの分布は、物質表面の法線方向に対して、急激に減衰します。その中に原子が入ったとします。近接場の光はもちろん電波の一種ですから、近接場の光が電磁波として持っている電界の振動方向に原子核と電子が変位しまして、同じ方向の分極が出来る場合と、それから場合によっては、同じ原子でも反対方向の分極が出来る場合と、両方あります。仮に、近接場の光の電界によって、電界が振動するのと同じ方向、言ってみれば同じ位相で振動するような分極が出来る時、出来た分極と電界との間の相互作用で、この原子は光のパワーの強い方向に引っ張られます。逆の方向の振動の仕方をする時、原子は光の弱い方向に引っ張られます。この力を双極子力といっていますが、こういうものを使うと、

真空中に浮いている原子が近接場の光の中に飛び込みますと、原子はこの物質の表面にくっつくか、はねかえされるか、ということになるわけです。

この実験は超高真空中で行います。くっつくか、はね返されるかは、使っている近接場の光の色によります。色というのは、実は言い方がおかしくて、色を区別するのは電磁波としての光の周波数です。毎秒何回、光の電磁波が振動しているかということです。

原子にはいろんな構造がありまして、その構造によって決まる原子に特別に共鳴する周波数がありまして、その周波数に対して光の色を表す周波数が若干高ければ、先ほどの図16のように、原子は物質表面からはね返されるような力を受けます。原子の特別な周波数に対して光の周波数がちょっと低ければ、原子は物質表面にくっきます。

それを利用して、われわれは、ガラスのファイバースコープから近接場の光を出させて、この近接場の光の周波数を適当に調節しておくと、場合によっては原子はくっついたり、はね返されるかもしれない、ということを考えています。しかし、これはなかなか難しく、一朝一夕には実現しませんので、その1つ前の方法を考えています。

そのためには、プローブの先の近接場の光ではなくて、図17に示すようにちくわ型のファイバーを用意します。ちくわですから中身が抜けているわけですが、内壁の周りを、断面がドーナツ状のコアが取り巻いているようなファイバーです。その外側はクラッドでコアを支えています。ドーナツ状のコアのと

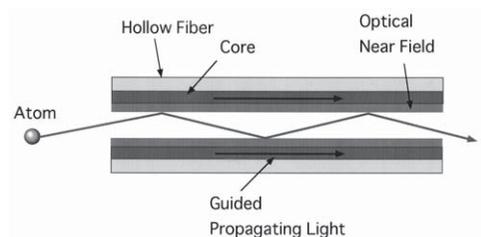


図17 中空ファイバ内壁面に発生する近接場の光による真空中の原子の誘導の説明

ここにドーナツ状の光を通しますと、この内壁のところに近接場の光が膜状に出てきます。もともと、ドーナツ状の光の周波数を、原子の構造によって決まる周波数よりも少し高くしておきます。そうすると、原子は内壁からはね返されます。すなわち、原子がちくわの中に飛び込んできたときに、この近接場の光の力を使って、ちくわの中を誘導することができるかもしれません。

原子がちくわの中を誘導されれば、誘導された原子をファイバースコープの先の近接場の光に当てて、そこでプローブの先でつかまえない、という希望もっています。

ということで、いくつかの実験を行ってみましたので、それらをご紹介させていただきます。日本のファイバーメーカーの技術力はものすごく高く、このようなちくわのファイバーが実際に出来きます。その内径の一番小さいのは、だいたい300nmぐらいですから、使う光の3分の1ぐらいの直径です。

いろんな原子で実験できるのですが、ここでご紹介するのは、ルビジウムという原子です。これはナトリウムの親戚です。ルビジウムは室温では水銀のような状態になっています。これを温めますと蒸発し、ガス状に原子が吹き出します。それを穴のあいた板に通して、ある程度平行に真っ直ぐに飛ばし、その先にさきほどのちくわのファイバーを置いておきます。同時にドーナツ状の光を真空の外から、窓を通して入れます。そうすると内壁に近接場の光の膜が、ドーナツ状にしみ出てきます。この中を原子が通り抜けるはずで、図18は、その実験結果の例で、光のパワーの増加とともに通り抜ける原子の数が増えることを示しています。ちなみに、使ったガラスファイバーの内径は300nm程度、長さは3cmです。これは原子から見るとほぼ無限に大きい長さです。ちなみに、300nmの直径で3cmの長さというものを、両者1万倍していただくと、内径3mm、長さ300mとなりますので、このように細くて長い管の中を微粒子が通るといふこととなります。

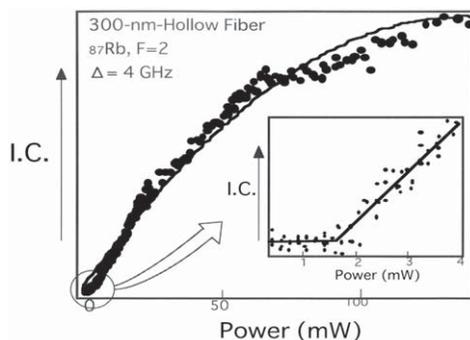


図18 内径300nmの中空ファイバを誘導された原子の数の測定結果
横軸はファイバに入射した光のパワー。縦軸は原子の数。内挿図は原点付近の拡大図。

応用には科学から技術までいろんなものがあります。たとえば、科学的には量子力学的な効果を検証する、技術的には飛び出した原子を結晶の板の表面に吹きつけまして新しい物質を作っていく。それから化学の人はご存じかもしれませんが、同位体を分離するというようなものです。

それ以外にも、いくつか量子力学的な効果もあるんですが、時間が残り少なくなったので省略します。将来はちくわ型のファイバーの中を通り抜けた原子をファイバースコープの先に出てきた近接場の光でつかまえ、さらにはつかまえた原子を基板の上にくっつけて、新しい物質を作る提案がなされていて、理論的な考察や、予備的な実験がなされています。

この技術というのは、実はルビジウムだけにしか対応できないということではなくて、目的とする原子が決まれば、原子の構造による特有の周波数に対応する光を使うことにより、いろいろな原子に対して使えます。たとえば紫外線を使いますと、シリコンをあやつることができます。言ってみれば、適当な色の光を出すレーザーの光源さえ用意できれば数多くの原子が扱えます。

今後、原子1個1個を小さな近接場の光で扱う技術が進むのではないかと期待しております。

最後に今後の展望について述べます。過去には計測ということに主体が置かれて、近接

場の光を使って、分解能としては20nmぐらいというのがチャンピオンデータといわれていた時代があります。これが1980年代の中頃から90年代に入る頃です。最近はプローブ技術の開発が進んで、計測の場合の分解能が0.8nmぐらいになってきています。

今後は単なる計測、分析ではなくて、加工、それから1個の量子ドットにスイッチのような機能を持たせ、非常に小さな光ICのようなものが出来るかもしれません。それから究極の技術として、原子操作ができると期待され、近接場光の光の本質や、物質との総合性の本質を調べながら、先ほど申しましたナノフォトニクスとかアトムフォトニクスというのができるかもしれません。ただ、これらの技術やその基礎となる科学は、先ほど申しましたように、ナノ技術に支えられたものです。小さいものを加工できる人が、こういった方向に向かって進むことができますので、光だけではなくて、物質を、それから材料を絶えず加工する努力が、どうしても必要です。

ただ、非常に幸いなことに、この分野は非常に日本の強い分野で、総合力としては欧米各国をしのいでいるといわれています。そのようなことで、ナノフォトニクスとかアトムフォトニクスが、ある程度並行してできると、それを融合して、新しいタイプの光エレクトロニクス、フォトニクスの分野ができるのではないかと考えております。

ご静聴どうも有難うございました。