

生研公開講演

ナノテクノロジーと先端デバイス

—Nanotechnologies and Advanced Devices—

荒川 泰彦*

Yasuhiko ARAKAWA

東京大学生産技術研究所第3部の荒川でございます。きょうはお忙しいなか多数御出席いただきまして、ありがとうございました。それではさっそく「ナノテクノロジーと先端デバイス」というテーマで話を始めさせていただきますと思います。

これは教科書の図からとってきたものですが (OHP)、半導体結晶において原子がどういうふうに並んでいるかということを示した絵です。この赤いものと黒いものがそれぞれ原子を示していると考えていただければよろしいかと思います。

いま私どもはこのような原子をどのようにハンドリングすれば、エレクトロニクスとして有効なデバイス構造を実現できるかということを考えるとともに、そのハンドリングの手法を開拓しようとしております。

これもポンチ絵であるわけですが (OHP: 図1)、先ほどの原子がつぶつぶなものとして書かれていますが、2種類の物質を適当に選んでやりますと、電子をこの白いところに閉じ込めることができるようになります。ご存じのように、よくみると電子は波動的振る舞いをしているわけですが、その振る舞いは、どのような構造の中に電子が束縛されるかということで決まってまいります。たとえば、このような壁があるときには (OHP) 直感的に明らかのように、電子は壁で反射することになるわけです。次に、何かこういうところに障壁があったりする場合を考えます。そのときには、やはり同じように反射するわけですが、実はある確率で通り抜けます。ふつうのわれわれの世界ですと、たとえばボールだとしますと、球の高さはこの壁より高くないとこちら側にいけないわけですが、電子の場合には低くても向こうに球が抜けていくことがあるわけです。これが有名なトンネル効果といわれるもので古典力学の範囲では説明のできない有名な現象です。

さらに、この壁を両側につけてやると、電子はこの中に

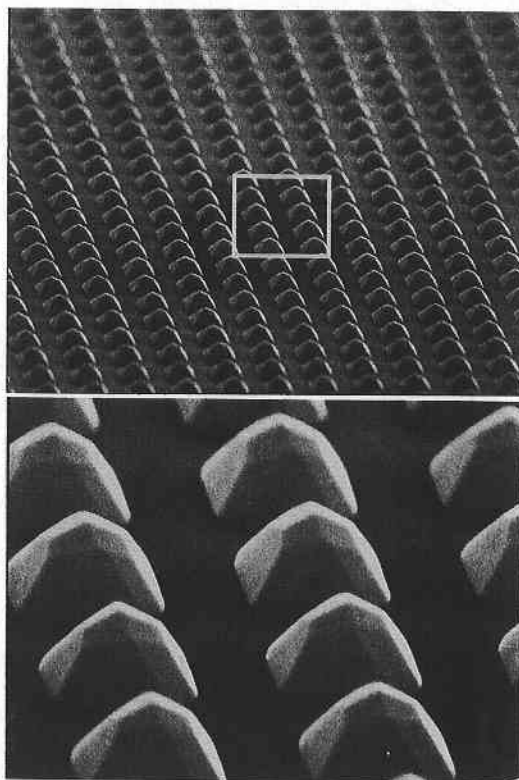


図1 量子ドットのSEM写真

閉じ込められることになります。ちょうどこの幅を電子のサイズに相当するくらいなものにしますと、ここにありまじくように電子の波としての性質が非常に顕著となってきます。ちょうどこれは導波管や楽器における波の共鳴現象に対応しており、同じことが電子の世界でも起こっているわけです。

私どもはこのような電子の波動的性質を積極的に利用して、新たなデバイスを開拓していこうということを努力してきております。いまやこの分野の研究は大きな流れをつくっておりまして、世界中で非常にたくさんの研究者がおりますし、また実用的にもいま重要な役割を果たしており

*東京大学生産技術研究所 第3部

ます。

具体的にいま世の中でこのような微細な構造をつくりつけて、どのようなデバイスが実現しているか、あるいは使われているかということを考えてみたいと思います (OHP)。時間がありませんので原理はとくに申し上げませんが、ここにありますように HEMT と通常呼ばれる非常に速いトランジスタやマイクロ波の発振器として使われる共鳴トンネルダイオードなどが電子デバイスとして使われております。また、光デバイスではレーザーとして、量子井戸レーザーの形で現在実用に使われております。また光変調器としても量子井戸構造が現在使われております。このように量子構造はいまやかなり現実的なテクノロジーになってきているわけです。

具体的にどうやってつくるかということですが、いろいろな方法があります。大きな流れとしては2つございます。1つは、有機金属気相成長法、あるいはMOCVDといわれる方法です。もう一つは分子線結晶成長あるいはMBEと通常言われる方法であるわけです。これらは非常に薄い薄膜を、原子オーダーの精度で構造を形成することが可能としているわけです。

この写真は、分子線エピタキシーの装置です (OHP)。この写真を見ていただいてもなにごんごよくわからないかもしれませんが、この中では超高真空状態を実現したうえで材料を基板の上に供給するという手法がとられています。一方 MOCVD のほうは、化学的な気相成長の現象を利用しており、やはり原子オーダーの精度で超薄膜構造を実現することが可能です。

これらの結晶装置を用いて作製した構造の1例を、透過電子顕微鏡の写真としてお見せしましょう (OHP：高解像度走査型)。これはアルミ・ガリウム・ヒ素が125とガリウム・ヒ素が100が交互に並んでいるような周期的な超薄膜構造になっております。現在、先ほども申し上げましたように、いまや一原子のオーダーで、ある層はガリウム・ヒ素にして、ある層はアルミ・ガリウム・ヒ素にするということが可能になってきております。つまり、私どもは膜厚方向については非常に精度よく制御することができるようになってきているわけです。したがって、ある意味ではこの技術は、材料系に依存するものの、基本的には確立された技術になっているといえます。1970年代からこれまでにかけてのいろいろな人の努力によってこのような状況が実現されてきています。

そうしますとわれわれは、次の段階としてどこに進みつつあるかということですが、これまでは、膜厚方向で構造を制御する、すなわちある次元方向の構造の制御を行ったということになるわけです。したがって、次に目指すのは、面内における構造の制御であるわけです。既にこの技術もかなり発展してきております。この写真は、われわれ

Electronic State in Quantum Microstructures

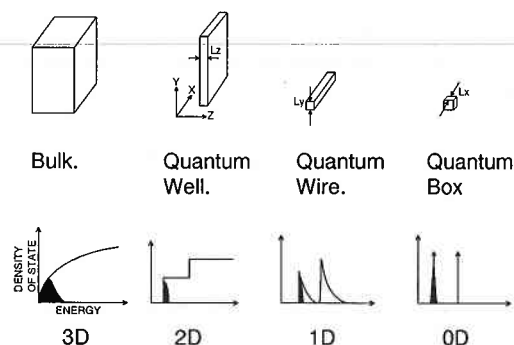


図2 量子ナノ構造の概念図と状態密度

の研究室で作った構造で量子ドットと呼ばれるものです。写真が示しますように和菓子みたいなものが規則正しく並んでおります (OHP：図1)。下の写真をよく見てみますと、これらの和菓子はすべて同じ形をしていることがわかります。これを結晶成長技術で実現するということが可能になってきているのです。これにつきましては後ほどご説明したいと思います。

まず、ここではこういうような構造をつくると何が起こるかということをもまず考えてみたいと思います。先ほどの薄い膜の中では、電子は膜厚方向は閉じ込めを受け、二次元方向に運動を行います。その結果自由度は2となります (OHP：図2)。ちょうど運動場で遊んでいる子どもと考えていただければ結構かと思います。それに対して、たとえば非常に細い線をつくったとします。ちょうどこのサイズというのは電子自身の大きさとほとんど同じであると考えていただきたいと思います。そうしますと、非常に狭い廊下を走っている子どもとほぼ同じような状況になるわけです。この場合には子どもはどちら方向に走っているか、あるいは廊下と逆方向に走っているか、その二通りしかないことになるわけです。したがって電子の動きがかなり整頓されてくることになります。このような細い線を量子細線といいます。

一方、さらにもう一つ縮めてみたらどうなるかということですが、こうなりますとまさに電子は檻の中に閉じ込められた状況になるわけでありまして、電子はもはや動くことができないわけです。それは先ほどの例えで言いますと、ちょうど皆さんがお行儀よく椅子にきちんと座っておられて、目の高さもだいたい一緒ですし、同じような姿勢をされている状況になっているといえます。これは、本来それぞれ違う電子がすべて同じようなエネルギー状態になっているということにつながります。したがって電子がより整頓された状態あるいは、より制御された状態になって

きているわけです。このような構造を量子箱と呼んでいます。

このように私どもが構造をきちんとつくり上げることで、電子の振る舞いを完全に制御することが原理的には可能になりつつあるわけです。ただしこれを実現するためには、先ほどの写真でお見せしましたように単に膜厚方向ではなくて、膜に沿った面内における量子構造、量子的な寸法を有する微細構造をつくりあげなくてはならないわけでありまして、いま私どもはそれにチャレンジしているわけです。

きょうこれからさらにお話しすることは、このような構造を実現することを目指したナノテクノロジーを私の研究を中心にご紹介させていただきたいと考えているわけです。

これまで電子の閉じ込めについて話しをしてきました。すなわち、電子のエネルギー状態あるいは電子の振る舞いが整備されてくるということを申し上げたわけです。この OHP では二次元電子状態、一次元電子状態、0 次元電子状態というふうにここに書いてございます。

実は私は光デバイスに関心を持っておりまして、レーザーを中心に研究しています。そうすると当然光子も制御してやろうということが次の夢となってくるわけです。光子も、先ほどのようにきちんと閉じ込めていくと、光子の性質を同様にまた制御することができるようになります。

あまり時間がございませんのでとくに詳しくは申し上げませんが、やはり光子についても、小さい箱や細い線をつくってやりますと、そのエネルギー状態を制御する、あるいは光の進む向きをきちんと制御することができるとい

なります (OHP: 図 3)。もう少し学問的にいいますと、光の量子場をきちんと制御できるということになるわけです。直感的に言えば光の方向とかエネルギーとか、あるいは光が本来持っている量子的な揺らぎというものを制御することが可能になるということになります。

そういうわけで私は、将来の光デバイスを考えるときに、電子と光子をナノ構造を技術で駆使してきちんと制御して、その結果電子と光子の相互作用をわれわれの思いのままにする、そして次の世代のレーザーをなんとか実現していきたいと考えております。

具体的には、たとえば非常に低電力でレーザー発振を実現する。また、情報を乗せるときは光をオン・オフしてやらないといけないわけですが、そのスピードを極めて高くしてやる事ができる。さらに、レーザーは本来非常にピュアな光だということをみなさん聞いておられると思うのですが、よくみるとじつは少しゆらいでいます。それをできるだけピュアな光にしていくことが、このような相互作用の制御によって可能になると私は理論予測をしてみました。このためにナノテクノロジーの開発に対して力を注いでいるわけでございます。

さて、そういうわけでナノ構造の作製技術について入っていきたいと思うわけです。どういうものをつくるべきかということですが、だいたい 10 nm ぐらいの箱や線を、大きさのばらつきがなく、また界面があまりガタガタしてなくて、つくりあげたいということが夢であるわけです。それは決して容易ではありません。また任意のパターンをもちろん実現したいわけです。そういう意味で単に寸法のみならず、つくりあげたものの精度、あるいは自由度みたいなものをきちんと確保していくということが重要でありまして、けっして簡単な技術ではございません。

作る技術には、大きく分けますと 2 つあるかと思います (OHP)。1 つは、ここに書いてありますように、最近「原子操作技術」という言葉がいろいろなところに出ていますが、原子を一つ一つどこから持ってきて、ちょうどレンガで家をつくるようなやり方があるわけです。もう一つは、先ほどから申し上げておりますような結晶成長技術を駆使してなんとかつくっていく。その 2 つがあるわけです。

前者のほうは、一つ一つやっていきますから、原理的にはなんでもできるといえばできるわけですが、きわめて長い時間が一般的にはかかると予想されます。おそらく一つの素子をつくるのに、いまだと 100 年ぐらいかかるかもしれません。そんなわけで、現時点では必ずしも現実的ではないのですが、いろいろな試みが走査型トンネル顕微鏡すなわち STM 術を中心に行われております。もう一つは、結晶成長を駆使したものであります。これは結晶基板の上に何かマジックをしておいて、あとは、結

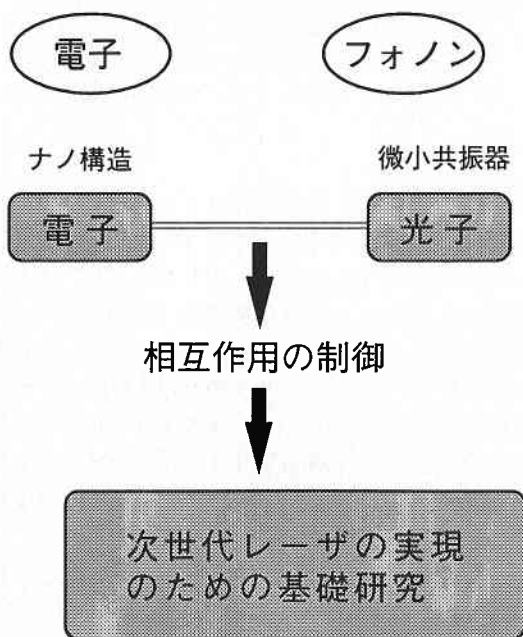


図 3 次世代レーザーの実現のための基礎研究

晶成長技術により全体をふりかけるようにして構造をつくっていくというアプローチであるわけです。ここではそれぞれについてお話ししたいと思います。

STM 技術については、私自身現時点ではやってなくて、これから始めようと考えているわけですが、そういうわけでありまして、会社（日本電子）のほうからお借りしてきた OHP でお話をさせていただきたいと思います。この技術は、先ほどお話しいたしましたトンネル現象を使っております（OHP：図5）。これが半導体の基板の表面でありまして、その先に針をもって来るわけです。この距離を、数オングストロームぐらいに近づけてやるわけです。そういたしますと、電子から見るとギャップがあるために壁があるのですが、先ほど申し上げたようにトンネル効果があるため電流が流れるわけです。逆に、このXYZのコントローラーを用いてこのチップの位置を、ちょうどトンネル電流が一定になるようにして動かしてやるわけです。

そういたしますと、たとえばこういう段差があるときには、ティップがここにきますとギャップが生じるわけですから、ティップの位置が下がるわけです。どのようにして下がったかということちゃんと検出してやることで、表面状態がどういうふうになっているかということがみえてくるわけです。もちろんこれはトンネル現象を使っておりますので、リアルな構造というよりは、電子的なポテンシャル結合がどうなっているかということが主な情報として入ってきます。

これは一例なんです、シリコンの構造を見たものです。このつぶつぶがアトムに対応するものになっているわけです（OHP）。また、これは拡大したものです（OHP）。いまの観測技術では、STMによりまして、原子一つ一つの振る舞い、あるいは結合状態がわかるようになってきます。そういう意味でSTMは観測手段として有効であるわけですが、一方、この他にもいろいろな試みがあります。それが先ほど申し上げた原子を一つ一つもってくるということに関連してくるわけです。すなわち、先ほどのような先端が尖ったティップがあるとします。今、たとえば非常に強い電界を外からかけてやると、ある条件下では、これはけっして容易ではないのですが、たとえば原子がこういうふう飛び出していくというようなことが可能になるわけです（OHP：図4）。したがって、これは夢のような話ですが、原子をつけて、それをどこかに持って行って、またどこかにつけてやるということをすれば、原子の配列を自由にコントロールすることができるわけです。もちろん口で言うのは簡単ですが、けっして容易なことではなくて、チャレンジングなテーマであるわけですが、適当な材料を選べばそれが可能になるというわけでありまして、これは原子のところにさきほど申し上げたような方法で電界をかけたものです（OHP：図5）。ここの部分が原子が引き抜か

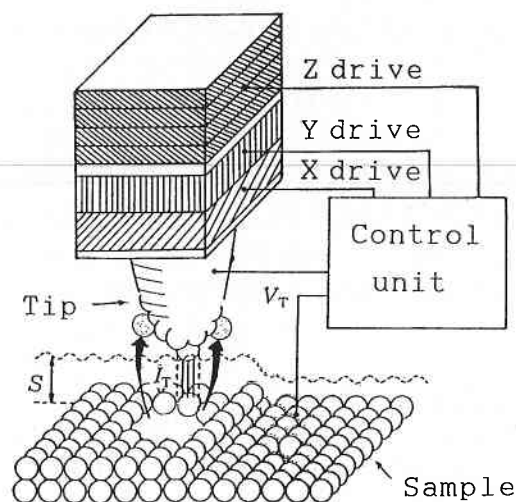


図4 STM 描画法の原理法



図5 Si(111)7-7 描画した文字（日本電子提供）

れたところだと考えていただければよろしいかと思います。

また、もちろん似た技術であるわけですが、たとえば次のようなこともできるわけです。すなわち、ここにティップがございまして、やはり電界をかけてやるわけです（OHP）。そういたしますと、原子が電界によってこういうふうひきずられて、シリコンのところに山ができるということが可能になるわけです。実際適当にバイアスをかけてやりますと、ここにありますように、ピラミッドみたいに見えます（OHP）。ちょうど、ここに筋みたいなのがみえるわけですが、これが1原子ステップになっています。まさにピラミッドみたいに、それぞれのところで石に対応するものが積まれているというような状況が実現されるのです。このようにアトムテクノロジーは、大変プロミシングな、またチャレンジングな技術です。

しかし、残念ながら、このような構造の試みはあるにしても、デバイスに使えるようなものは今のところできておりません。これから急速に発展すると思うわけですが、現時点では未来的な技術でありまして、まさにわれわれ研究者がこれから志向していかななくてはならない方向の一つであると思われます。

さて、もう一つのアプローチがあります。それは、私どもが確立してまいりました結晶成長技術に基づくものであるわけです。これは先ほどから申し上げておりますように、一つ一つをレンガを持ってくるのではなくて、何かぱっとふりかけて構造をつくり上げようというわけです。と申しましても、そのなかでもいろいろなアプローチがあるわけです。一つの方法は、通常の薄い層をつくっておいて、リソグラフィ技術で非常に細い線のマスクをかいてやります。その後エッチングをしてやるのです。それは化学的なエッチングでもいいし、イオンエッチングみたいなものでもいいわけです。その結果こういうふうに移り込んでやるわけです (OHP)。このような技術を用いても 10 nm くらいのものができております。しかし、残念ながらエッチングがありますので、どうしても界面のダメージが避けられないわけです。すなわち、ノミで強引に削っているというようなものでして、どうしても傷がついてしまいます。

もう一つのアプローチがあります。それは、結晶表面になんらかの種を置いておくわけです。その種が何であるかというのはそれぞれいろいろあるわけですが、そのうえで結晶成長をしてやるのです。そういたしますと、結晶成長の振る舞いが、その種によって何か制限を受けて、あるいはそれに制御されて特有の形を自己組織的に作りだすということになるわけです。さらに種がなくても何らかの制約条件、たとえばひずみなどですが、により自己組織的に構造ができる場合もあります。

いくつかの試みがすでに世界中で行われておりますし、私どもも試みています。それについて少しお話をしたいと思っております。私どもは MOCVD という結晶成長の技術を使っております。これは先ほど申し上げましたように薄膜形成技術において MBE と並ぶ代表的な結晶成長技術であるわけですが、この場合には化学反応的なプロセスが入ってきます。そのためにいろいろな振る舞いが、MBE と比べて強調されることになりまして、自分自身すなわち自己組織的におもしろい構造をつくりあげることがしばしば起こります。

これは一例ですが、いま SiO_2 という膜を、これはガラスですが、半導体表面につけてまして、ここだけ開けてやるわけです (OHP)。その状態でふつうの薄膜を成長をするような結晶成長を行ってやります。ここに示す結果は開口の幅が異なるものについて結晶成長を行ったものです。この軸が成長時間に対応すると考えていただきますと、これ

らの結果は時間がたつと自分自身で三角形になることを示しています。彫るようなことは一切せずに結晶成長そのものではこういうような構造を自然に作ることもできるので

す。これはなぜかと言いますといろいろな要因があります。 SiO_2 の上では結晶成長しないという性質があります。したがって SiO_2 によって形成されたパターンで決まる境界条件があらわれます。一方、結晶長レートが結晶の面の方位によって異なってくるのです。この2つの要因により構造が自然に形成されるのです。

実は、これからおみせする量子細線の作製技術は、この現象を利用しております。具体的にどういうふうに行っているのかと申しますと、まず SiO_2 のパターンを電子ビームのリソグラフィ技術でつくってやります。だいたい周期は 200 nm ぐらいで、幅が 30 nm ぐらいだと考えていただ

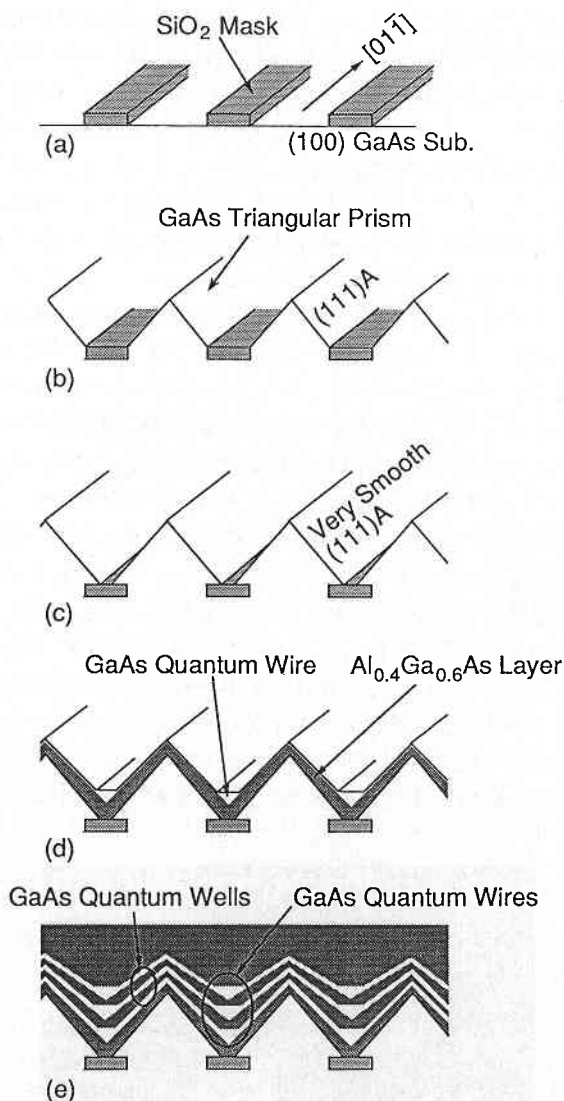


図6 量子細線の作製プロセス

きます (OHP: 図 6)。それで結晶成長をしてやるわけです。先ほどおみせしましたように、この場合には三角柱が出来上がるわけです。さらにもう少し成長してやりますと、 SiO_2 の上に覆いかぶさるように横方向に結晶成長が行われます。この状態でガリウム・ヒ素からアルミ・ガリウム・ヒ素に変えてやります。この場合アルミニウムが入ってきますと、結晶成長の振る舞いが大きく変わります。したがってここにありますように、非常にシャープな V 溝が出来上がるわけです。この状態でまた少しの時間だけ再びガリウム・ヒ素をつけてやります。そういたしますとガリウム・ヒ素が V 溝の中にちょっとだけ水をたらしたと同じように底にたまりこみ、その結果量子細線が出来上がるわけです。

写真をおみせしたいと思います (OHP)。これがまず先ほどの V 溝をつくる途中の写真です。非常に規則正しく並んでおります。けっしてこれは彫ったのではなくて、結晶成長でつくりあげたものです。実はここは結晶面があらわれているために非常になめらかになっております。この V 溝の底に量子細線が形成されます (OHP: 図 7)。量子細線のサイズは、ガリウム・ヒ素の原料をどのくらいの時間供給するかによって自動的に決まっています。ここにありますように、逆に量子細線の成長時間を少しずつ変えてやることによって、横寸法を任意に変えてやることができます (OHP)。

いまお見せしたのは SEM の走査型電子顕微鏡の観測写真ですが、もちろん構造ができたからといって、その中の電子が本当に閉じ込められているかどうかというのははっきりしないわけです。そのためにわれわれは、レーザーを当てその電子を構造のなかに励起させて、その電子がどのような振る舞いをしながら再び光を出すかということ調べることによって、その電子のエネルギー状態を知ることができます。これはフォトルミネッセンスによる測定結果ですが (OHP)、横寸法を変えていったとき、電子のエネルギーが閉じ込められない場合に比べて非常に上がっていくことを示しております。この振る舞いがまさに量子細線効果の存在を示しているわけであり、もちろんこれ以外にいろいろな方法で検証しております。たとえば磁場を使う方法などございますが、時間がござい

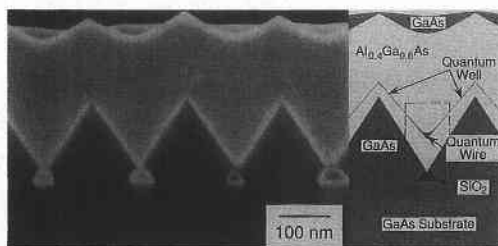


図 7 GaAs 量子細線の断面 SEM 写真

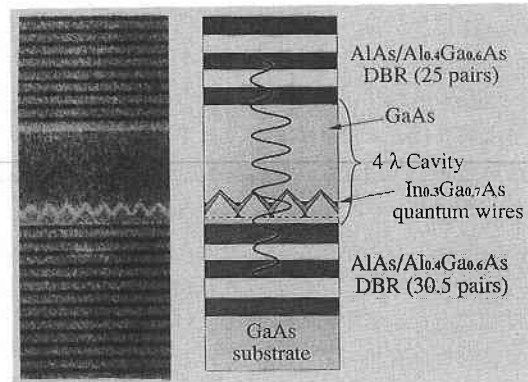


図 8 微小共振器型量子細線レーザーの描画図と断面 SEM 写真

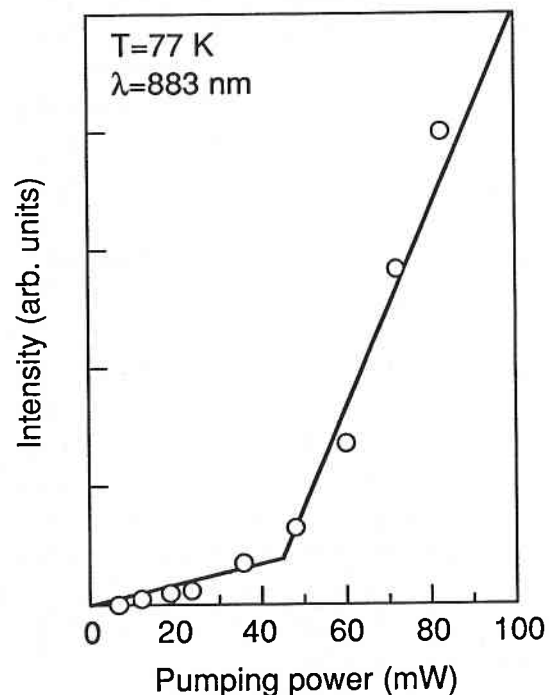


図 9 微小共振器型量子細線レーザーの入出力特性

ませんので、それについては割愛させていただきます。

われわれは、このような構造をつくるだけでは満足しておらず、デバイスをつくり上げたいと考えております。今からおみせしますのはその一例です。半導体レーザーでは、超薄膜構造を使ったレーザーが量子井戸レーザーとしてできております。それから垂直共振型のレーザーは面発光レーザーとしてできております。したがって二次元電子と二次元光子の相互作用によるレーザーというのは出来上がっております。私どもが最近世界最初に試みたのは、一次元電子と二次元光子の相互作用によるレーザーの実現であります。具体的にどのような構造になっているかということですが、まずミラーの役割を果たす周期構造をつくります。ここで先ほどと同じように量子細線をつくらせてやります。上側

にもミラーをつくってやります。光子は閉じ込められてます。こちら方向に閉じ込められてます。したがって次元は2になっております。一方、電子のほうはこちら方向のみにしか自由に動けませんので、次元は1となります。このようにしますと光の波をどのような分布にさせるか制御することが可能になってきています。ちょうど光の強度が強いところ、すなわち場が強いところに量子細線を置くというようなことが可能になってくるわけです。

これがその写真でありまして、ここのぎざぎざしたところに量子細線が入っておりまして、全体としてレーザー構造が出来上がっているわけです (OHP:図11)。このような構造で、きちんと共振器の効果が存在することを確認したうえでレーザー発振の実験を行いました。その議論の、詳細については省略いたしますが、結果として、これは光ポンピングで、まだ低温なんですけど、レーザー発振が起こっていることが、明らかになっております (OHP:図12)。私どもは、こういうレーザーというのが、電子と光子が完全に制御されたレーザーへの第一歩と考えておりまして、さらに今後研究を進めていきたいと考えております。

以上が量子細線の作製ということでお話しさせていただいたわけですが、次に量子箱に関する技術についてご紹介したいと思います。講演の前半でこういう写真をおみせしましたが、これはどういうふうにしてつくっているかといいますと、先ほど量子細線のときに使いましたように、 SiO_2 の膜をつけてやります。そのうえで四角のウィンドーをつくってやるわけです。そういたしますと、選択成長のメカニズムから SiO_2 の上にはつかずに、あいたところだけ結晶成長が行われるというわけです。その現象を使っているわけです。これは結晶成長でつくっておりますので、すべてこういう形でそろっているわけです (OHP)。これはノミで削ったようになっていますが、これは結晶面です。まさに自然がこういうものをつくりあげておるわけです。いまの材料はインジウム・ガリウム・ヒ素という材料です。

一方、今度は材料を変えてアルミニウム・ガリウム・ヒ素にしますとまた形が変わってきます (OHP)。よくみていただきますと、これはもとのマスクの大きさなんですけど、そのマスクの大きさに対してお城の石垣みたいになって上が狭くなってきています。こういうことを使うと、多少マスクが大きくても、その上のところでは小さなものができるために、この上に先ほどのガリウム・ヒ素を乗せてやると、かなり小さな箱ができるであろうということが想像できるわけです。もちろんパターンもある程度小さくしていかなければいけません。

まずそのパターンですが、これはけっこう大変なんですけど、とにかく電子技術を駆使してつくり、それで結晶成長を行ったものです (OHP:図10)。こういうふうにして石垣み

たいになっているアルミニウム・ガリウム・ヒ素の上にガリウム・ヒ素を少しだけつけます。そうすると、これは断面図ですが、ガリウム・ヒ素ドットがここのところにできております (OHP:図14)。これは25 nmでありまして、こういうようなパターンを使った結晶成長の手法では世界最小のサイズになっております。

こういう構造でもちゃんと光るだろうかということですが、光ります。これはフォトルミネセンス・スペクトラムというのですが、ここのピークが箱からの、あるいはドット構造からの発光であると考えられます。ところが、あまり詳しく申し上げられないのですが、ご専門の方はおわかりのように、スペクトルの幅が広いわけでありまして、これはいろいろなエネルギーに電子が分布していることによります。なぜかという、さっきのように行儀よく閉じ込められたにもかかわらず、箱のそれぞれの大きさが微妙に違うからです。そうしますと、同じサイズの椅子に電子がすわっていたら、それらのエネルギーは同じようになっているけれども、その大きさがまちまちで、小さな椅子におとなしく座っている電子から、大きなソファで寝そべっている電子もあるわけです。そういうことで、このような広がりをもってくるのです。

そういたしますと、一つはその広がりをなんとか抑えようという技術の開拓と、どうせなら、一つ一つのこういう微細構造にアクセスできないだろうかということを考えたくなります。ここだけの情報をなんとか取り出せないだろうかということなんです。

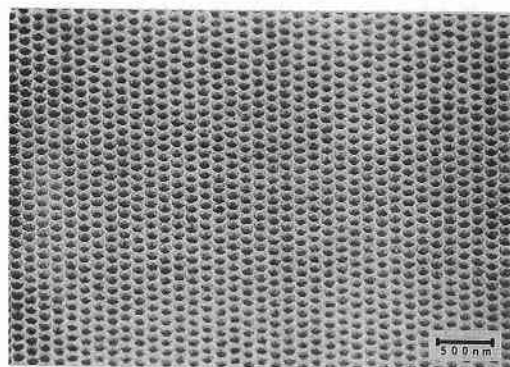


図10 GaAs ドット列

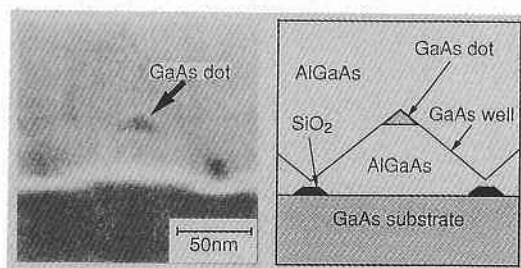


図11 GaAs 量子ドットの断面 SEM 写真と説明図

こういうことが可能であろうかということなのですが、原理的には可能です。これはまだ予備的な実験ですので、レーザー光をものすごくしぼってやって実験をしてみました。ビーム径は約 0.7 ミクロンです。また、量子箱の周期を 1 ミクロンぐらいに大きくしてやりました。そうするとひとつの量子箱を励起することが可能になります。ここにつぶつぶが見えますが、これが一つ一つのドットの発光で、量子箱からの発光になっております (OHP)。スペクトラム上でどういうふうに見えるかということなのですが、20 個のドットの場合にはだらだらと広く先ほどと同じようになっています (OHP)。それに対して 4 個の量子箱のみを励起してやると、こういうふうに少しずつピークがみえてくるわけです。だんだん各量子箱における個々の電子のエネルギーがどういう値になっているか分離できるようになってきたのです。1 つの量子箱だけ照射すると、たしかにこの図が示すように 1 つの狭いピークだけになってしまうことが示されるのです。こういう技術が、今後重要になると考えられるわけですし、1 つ 1 つの量子箱にアクセスをして、その情報をいろんな意味で取り出したり、あるいは書き込んだりする。その基礎技術にこれらの技術はなっていると考えられるわけです。

さて、この量子箱の作製技術は、申し上げましたように種をつけてそれで結晶成長を行うことに基づいています。この場合電子線描画装置が不可欠となります。これは大変高価な装置でありまして、結晶成長装置以上に大変です。また技術的にも非常に難しいものです。われわれもなんとかそれをこなしているわけですが、実は最近もう一つの方法で量子箱をつくることができました。現時点ではたぶん世界で最小の量子箱だと思います。

実はこれからお話する結果は、きょうの夕方、横浜で開催されている MOCVD 国際会議のポストドクトラインセッションで、私の研究室にドイツから来ているポストドックの人が発表することになっているものです。したがって今の時点では未発表といえます。まず作製方法の原理を述べましょう。ガリウム・ヒ素の上にインジウム・ガリウム・ヒ素というものをつけてやります。それを 1 原子層だけつけてやると、ガリウム・ヒ素とインジウム・ガリウム・ヒ素は少しだけ異なった格子定数をもっているため、インジウム・ガリウム・ヒ素は歪みを受けながら膜として成長します。それに対して 2 原子層を積んでやると、歪みがものすごくきつくなってくるため、それだったら、こういうふうに集まってしまったほうが安定であるということになるのです。このときにできる量子箱のサイズは、そのときの凝縮力みたいなものと拡散との一種のバランスで決まってきます。これを利用してやると、パターンは何もつくらなくてもこういう構造をつくるのが可能になるわけです。

そんなことが本当にできるかどうかということですが、実はできるのです。まず、これをみていただきます。これは高解像度の SEM で観察した結果ですが、ふたつの量子箱が見えます (OHP)。条件を変えるとこの写真のように量子箱の和の密度を増やすことが出来ます (OHP)。また、これを AFM (アトミック・フォース・マイクロコピー) でみるとこのようになります (OHP: 図12)。このように何も事前にプロセスをしなくてもちゃんと量子箱ができるわけです。問題が 1 つあります。それは量子箱の位置を制御できないことです。完全に結晶がユニフォームであれば、おそらく等間隔に原理的にはできるはずですが、わずかなステップの揺らぎ、原子オーダーの揺らぎがランダムに存在しているため、どうしても量子箱の位置もランダムになってしまうのです。そこが先ほどのやり方とちょっと違うところです。それなりに、それぞれに長所、欠点というのがあるわけです。この写真は一つの量子箱をみたものです (OHP: 図13)。この幅が約 15 nm です。これは世界で最小の量子箱です。

このように私どもは、ナノ構造を結晶成長技術を利用してつくる技術をかなり確立させてきたのではないかと考えております。

たとえば 1982 年に量子箱構造を提案したときには、それは当然 21 世紀の構造だろうと思い、理論的にとりあえずやっておこうというような気持ちで研究を開始しました。ところがいまや、先ほどおみせしたような状況でございまして、決してこれから容易な道ではないのですが、ものになるナノ構造がわりと近いところにあるかもしれない、そんな思いで現在研究を進めております。

最後にごく簡単にまとめますが、先ほどから申し上げましたように電子と光の制御をはかるためには、構造自体を

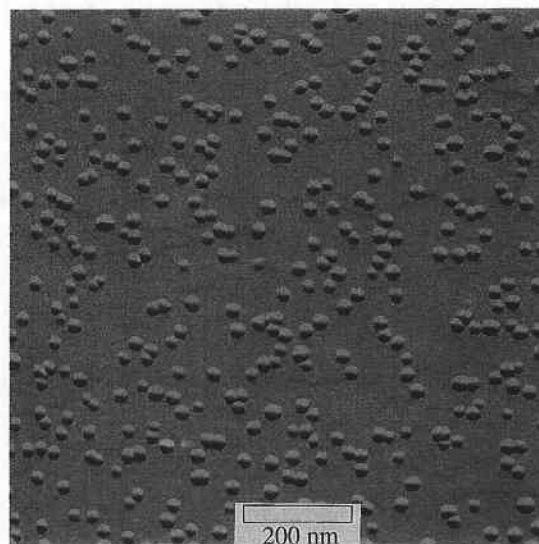


図12 InGaAs 量子ドットの AFM 写真

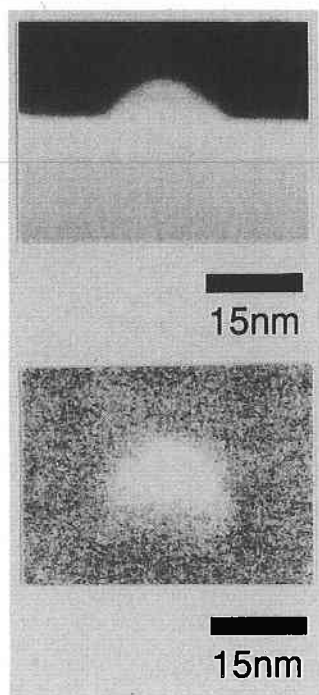


図13 InGaAs 量子ドットの SEM 写真

完全に制御する必要があるわけです。そのためのアプローチのひとつが、いわゆるアトムテクノロジーであるわけです。ただこれはなかなかうまくいかないだろうということ、で、次の世代のテクノロジーのような気がします。ただしこれについても今から研究はやっておかないといけないわけで、そうすることにより新たなブレークスルーを期待できるかもしれません。しかし、おそらく結晶成長とアトムテクノロジーの組み合わせがいいのではないかと私自身は思っております (OHP: 図14)。つまりアトムテクノロジーで適当な種をつけてやって、それで結晶成長をして全体の構造をつくるという方法です。これもそう簡単ではないと思うのですが、そういうアプローチが結構有望ではないかと思っています。先ほど結晶成長のひずみを利用して量子箱をつくったが、位置が制御できないことが問題だと申し上げました。位置が制御できないというのは、エンジニアリングとして気にくわないわけですが、ところがアトムテクノロジーで位置を決めて、それでさっきのような技術をもってくるとけっこういいものができるのではないかという気がするのです。だから種をつけて、結晶成長をする、これは一種のコピー操作に対応するのですが、そういうことをやるのがこれからのナノテクノロジーの進むべき一つの方向ではないかと考えております。

もっともこういう技術はどんどん変わってまいります。また新たな、われわれが考えつかないようなブレークスルーが出てくるかもしれません。そういう意味でいろんなアプローチを並行して追究しなくてはならないと思います

量子ナノ構造の完全制御

アトムテクノロジー 原子ひとつずつ配置する

問題点: 時間がかかりすぎる

結晶成長とアトムテクノロジーの組み合わせ

Seeds
Copy

要求されるもの

1. サイズ
2. 精度、一様性
3. 密度
4. 自由なパターン

量子およびその相互作用の完全制御

光子
電子
フォノン (音子)

量子ナノ構造 (電子マイクロ共振器)
光マイクロ構造 (光子マイクロ共振器)

電子と光子を一つずつ制御する。

図14

けれども、今申し上げた考え方は一つの流れになっているのではないかと考えております。

究極的には、私はエレクトロニクスをやっている立場から光子と電子、それに関連するフォノン、結晶格子、あるいは音子、これらを完全に制御しつくして、狙ったデバイスをつくりあげるということを追求していきたいと思います。

その一方では、あと10年20年たつと、ひょっとするとわれわれは所望のアトム構造、ナノ構造を自由自在につくることができるかもしれないわけでありまして、そのときに何をやるのだということを今から真剣に考えなければいけないと思っています。一つ一つアトムが制御できるようになったとしても、その次にじゃそのアトムをどうやって組み合わせなければいいか、どういうネットワークをつくっていいかということは、ある意味では電子系の多体問題にもつながるわけでありまして、決して容易な道ではないわけです。脳で考えますと、脳の細胞を、たとえばなんらかの形で実現できたとしても、それを機械的に100億個ぐらい持ってきたとしても、けっして脳にはならないわ

けです。きちんとしたネットワークをつくって、有機的に結合してやらないといけないわけです。それと同じようなことが、これからのナノテクノロジーのあとのデバイスのデザインに起こってくるのではないかと考えております。

そういうことも研究してみたいと考えて、現在研究室の人たちとがんばって研究しております。どうもご清聴ありがとうございました。

質 疑 応 答

○質問 先ほど、新聞の切り抜きで、極限のレーザーというのができつつあるということで、荒川先生自身は、21世紀のレーザーだと思われていたものがずいぶん早めにできそうだという印象をもたれていると思うのですが、あとどういふ課題があって、いつぐらいにそれらしいものができそうかという見通しなどがありますでしょうか。

○荒川 私はつくる技術については、現時点では次のような段階にあると思います。すなわち、先ほどからおみせしておりますように、寸法に関してはなんとか小さなものができるようになってきているわけですが、ここにありますように精度とか一様性とか、位置の制御とか密度についてはまだまだ未熟な段階なのです。これらを本当に克服していかないと、実はわれわれが机の上で計算しているようなレーザーは出来上がらないわけでありまして、そういう意味で課題は山積みしてます。ですからわれわれはまだまだ研究の飯の種は、10年20年はないのではないかと考えております。多分多くの障害を乗り越えなければならないと思っています。

○質問 非常に卑近な問題ですが、もしそれができましたら、われわれの日常生活にどういう応用製品として便利になるのか、たとえば電話機だとか、コピーとか、いろいろございますが、どういうものがあらわれるのでしょうか。

○荒川 たとえばこういうものをきちんと制御できるようになると、われわれは、集積回路に光を取り込みながら非常に理想的なものをつくるのが可能と考えています。集

積回路において今後ボトルネックになっていくと考えられるのは、配線の問題です。今は64メガビットとかそのくらいですが、将来1ギガビットとか、そういうふうにはメモリーの容量が大きくなると、いろいろな情報処理が可能になって、マルチメディア絡みのいろいろなアプリケーションが期待されるわけです。しかし、そのメモリーの容量を大きくしていったときに、いわゆる電氣的な信号が伝播する速度が遅いため配線の問題により、スピードが落ちてきます。そのあたりの問題が光を導入することにより解決される可能性があります。したがって、たとえばシリコンの上にそういう光を自由に乗せて、しかも、最も消費電力の低い形で、理想的に設計してやりますと、熱もわずかにしか発生せず、無駄のないメモリーができるわけです。そういたしますと、今度はメモリーの容量をさらに大きくすることができます。さらにこれまで申し上げたようにナノテクノロジーが確立しますと、集積度もさらに今よりもますます上がるわけです。結局ナノテクノロジーの発展によりメモリーの高速化、大容量化が期待されるのです。

こうなると、従来考えつかなかったことができるかもしれないということになるわけです。たとえばわれわれがメモリー、たとえば16メガビットのメモリーで考えることと、10ギガビットのメモリーが、これくらいのチップの中に入っているという場合とでは、考えることが変わってくるわけです。辞書に限らず、あらゆる本がこの中に入るとか、あるいは音声認識で、認識そのものを含めて、こんな小型のなかでできる。そうすると新たなアプリケーションが生まれてくると思われます。

アトムレベルと、いま申し上げたアプリケーションは、ハイアラキーがぜんぜん違うので、すぐにこれとこれがダイレクトに結びつくというのは申し上げにくいのですが、こういうことを積み重ねることによって量が非常に変わってきて、次に量の変化が質の変化をあらたに生み出すというふうを考えております。ナノテクノロジーはそのための基本的な技術になりうるものと信じております。

(1994年6月3日講演分)