

## 「ナノエレクトロニクスへの期待と展望」

榊 裕之 (東京大学生産技術研究所 教授)

### はじめに

今日は、ナノテクノロジーに関する様々な講演がありました。最後の講演者としてナノスケールの技術や科学が将来のエレクトロニクスにどんな影響を与えるかについてお話をさせていただきます。

話のキーポイントのひとつは、この50年間進んできたエレクトロニクス技術が、今後ナノテクノロジーの活用によってどのように量的に進化するか、特にLSIや通信用のデバイスがどのように発展するかです。これについて前半で議論をします。

続いて、第2のポイントとして、これからのITを質的により豊かにするには、今まで取得しにくかった情報を得るための新しいセンシング技術を展開する必要があることを論じます。電荷や光子や分子に対して敏感なセンサなどの技術が進むと、医療などの分野で人間にとって大切な情報が獲得でき、IT技術の質的進展をもたらすと思います。

最後に、量子的な状態を情報として使う技術について論じます。量子コンピューティングとか量子通信などの潜在可能性を明らかにするには、材料科学や素子工学上のブレークスルーが必要であることを指摘します。枠組みの違っ

た新しい情報システムをつくるには、ナノテクノロジーを地道に育て、電子を高度に制御する必要があることを指摘して今回のシンポジウムをまとめます。

ナノエレクトロニクスの基盤は、半導体のナノ構造です。その代表的なものが、非常に薄い超薄膜です。さらに超薄膜を多層化した超格子も登場し、多彩な利用がなされています。さらに電子の閉じ込めを強める構造として量子的な細線と量子的なドット(箱)構造もあります。(図1参照)超格子は1969年にEsakiとTsuによって提案され、70年代に超薄膜形成技術が進化したため、その後大きな発展を見せています。他方、量子細線やドットの基本構造と素子応用は、1975年以降に小生らの一連の研究で提案され、80年代後半から世界的な関心が高まり、試作の努力が活発化し興味深い知見が続々と出されている系です。しかし、まだ難点も多く、作製技術の高度化が待たれています。

飯島らの研究で1991年に登場したカーボンナノチューブも、金属系と半導体系があり、後者は量子細線の一種と位置付けられています。ナノ構造研究の目標は様々ですが、IT技術を高度化するのに活用すること、一味違ったナノ構造の活用方法を開拓し、日本のエレクトロニクス技術や情報通信技術が先んじるきっかけを作ることなどがあります。地道な応用分野の高度化と新領域での探索とに大分されます。後者の中で最もハードルの高いもののひとつが量子コンピューティングであり、実現するまではその価値や波及効果が本当にはわからない分野のひとつです。研究には多様な試みを奨励することが必要と思われる。

### MOSFET・LSIとナノ構造

ICの基礎概念が出されてから40年を経て、ICやLSIは驚くべき発展をしてきています。LSIではシリコンのMOS型電界効果トランジスタ(FET)が主として使われ、日本だけでも5兆円近い産業規模になっています。このMOSFETは、シリコン結晶表面に2ナノメートル(nm)程の非常に薄いシリコン酸化膜を作り、膜の上下に加える電圧によってONとOFFを制御しています。(図2参照)

この酸化膜(O)の上に金属(M)電極を設け、下にはシリコン半導体(S)を置いてあるため、MOS素子と呼ば

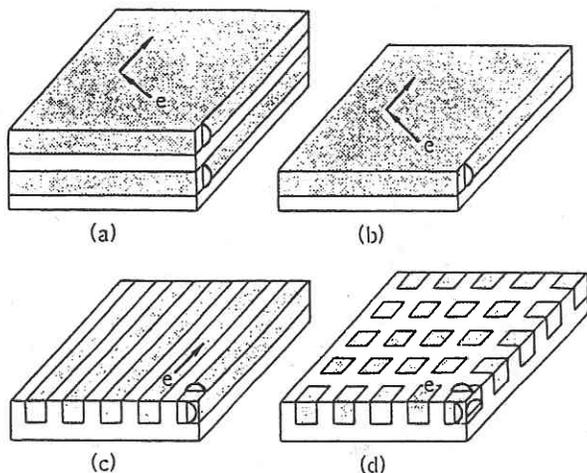


図1 様々な量子デバイスの概念図。(a) 多重量子井戸(QW)または多重超格子(SL)、(b) 1個の量子井戸(QW)、(c) 量子細線(QWR)、(d) 量子箱(QB)。

れますが、この構造は一種のコンデンサであり、上下に加える電圧で半導体の電子の数を増減できます。この絶縁膜の厚さは、15年毎に10分の1まで薄くなってきており、2ナノメートルに達しています。5兆円の産業の最も大切な部分がナノメートル級の酸化膜であり、これによって機能が維持されているのです。従って、非常に薄い絶縁膜の技術を進展させ、特性を十分に制御していくことが非常に重要なのです。

特に最近では、MOSFETの一種のフラッシュメモリが大きな役割をしています。MOSFETの絶縁膜の内部に設けた電荷蓄積層に、電気的手法で電荷を入れたり出したりし、この電荷の有無によって情報を記憶しています。電荷はトンネル効果で蓄積層に出入りし、これが広く利用されているのです。トンネル効果を用いた素子に関しては、江崎先生のトンネルダイオードが最も有名ですが、広く使われるには到っていません。むしろ、フラッシュメモリ用のトンネル酸化膜がますます大事になっており、その制御が非常に重要なのです。

通常のフラッシュメモリでは、電荷をためこむために、酸化膜中のシリコンの膜を用いています。この膜をナノ級の微粒子で代替する技術が世界中で探索されています。今までの素子とは違った機能が出るということが明らかにされています。

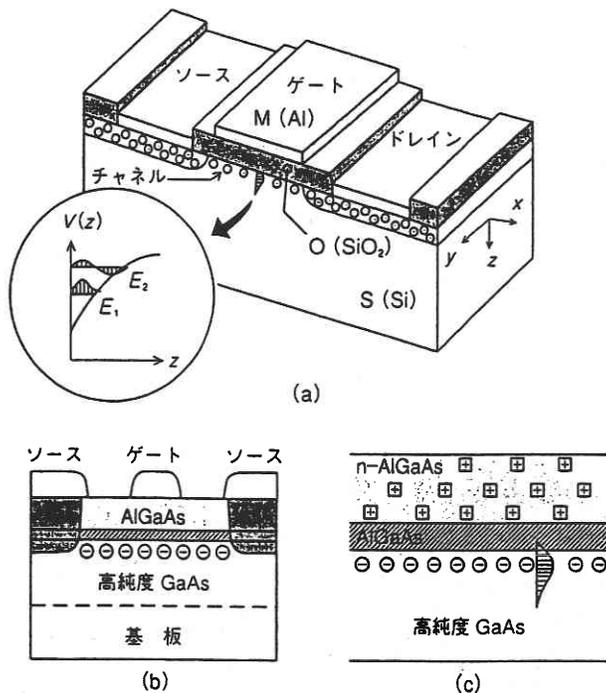


図2 シリコンMOS電界効果トランジスタ(FET)と電子の量子的閉じ込めポテンシャル $V(z)$  (a), ヒ化ガリウム系ヘテロ構造を用いた高電子移動度トランジスタ(HEMT) (b)と伝導路の直上の障壁に導入された正のドナー不純物と電子の量子閉じ込め(c).

ます。情報の保持時間を改善すればいずれ実用化の線が見えてくるでしょう。そのためには、ナノ結晶へのトンネルやナノ結晶と酸化膜との界面の欠陥の制御技術など地味な研究をきちんと進めることが重要です。

さて、LSIの性能を高めるために、MOSトランジスタの微細化が進み、ゲート電極の長さは100nm以下となり、大量生産のものでもゲート長を70nm程に設定する時代が近づいています。このため、超微細加工技術の確立が非常に重要です。コストさえ厭わなければ、電子ビームを用いて10nm以下の素子でもできますが、安価な手法でそれを実現する技術はまだ存在しないのです。この領域の技術開発には、深紫外域での光学、部品やマスクの開発など総合的な製造技術の確立が不可欠であり、研究者は多様な知恵を出す必要があるのです。

### 通信用FETとレーザー

さて、社会が大きな恩恵を受けている通信技術に目を向け、ナノテクとの関連を論じます。通信技術では、超高速のトランジスタと優れたレーザーが重要な役割を果たし、光通信や衛星通信などを可能としてきています。特に超高速のトランジスタとしては、図2(b)に示したガリウム砒素やインジウム砒素系材料を伝導層とした高電子移動度トランジスタ、HEMTがあります。この素子は我が国で1980年に生まれて以来、周波数特性が毎年改善され、ゲート長を30ナノメートルに設定した素子では500ギガヘルツを超える周波数帯での動作が実現しつつあります。

500ギガヘルツとは、一秒に5000億回の振動に対応します。毎秒1兆回の振動はテラヘルツと呼ばれますが、トランジスタの動作が0.5テラヘルツに達したわけです。テラヘルツは昔から到達しにくい領域とされてきましたが、トランジスタを用いてテラヘルツを制御できる状況が初めて生まれつつあるのです。

通信の容量を増やすだけの技術開発は、今後は意味が薄れると思っており、テラヘルツの電波の新しい利用法を開拓する方が、人間にとって意義が大きくなると思います。例えば数百ギガヘルツの周波数領域では、様々な気体が、特定の周波数の電磁波を吸収することが知られています。水や酸素の濃度に応じて、電波の吸収量が定まるので、環境をモニターする手法として有望です。数百ギガヘルツで動くトランジスタを安価に作れば、台所や工場などで空気中のモニターに活用できることになりましょう。単なる通信ではなくセンシング技術への応用も考慮すべきだと思います。

通信用の第2の中核素子はレーザーですが、別の講演で論じられているので省きます。レーザーの発光部にナノ薄膜を用いて性能が大進化したわけですが、良質な細線やドットを用いれば、さらなる進展が予測されます。このこと

は、1982年に荒川教授と小生とが初めて指摘したのですが、近年実験的研究が著しい進展を見せています。レーザは、また、発振波長域も非常に広がっていますから、通信に利用するだけではなく様々な計測に利用することにも技術を展開すべきというのが私の強調したい点です。

### 量子準位を用いた赤外およびテラヘルツ素子

さて、次にナノ構造を用いた新しいデバイス応用の話にもう一度話を向けます。ナノ構造の新機能の源になる物理現象としてはいろいろあります。その一つは、ナノ構造の中に閉じ込められた電子の作る定在波が特定の振動数の状態となることを用いるものです。

図3のようにナノ構造内の電子の波は、山が一つの基底状態と、もう一つ上の励起状態を作ります。従って、ナノ構造は特定のエネルギー(振動数)の電子や光だけを選び出すフィルターとして作用するのです。つまり、ナノ構造では、その寸法を調整すると、バイオリンの弦のように振動数が変化するため、共鳴する周波数やエネルギーを調整できます。例えば、10ナノメートルの長さの構造での共鳴エネルギーは0.1電子ボルトぐらいになります。寸法を10ナノメートル以上にすれば、より低いエネルギーで共鳴します。この振動数は、光でいいますと、波長が10ミクロンから100ミクロンの遠赤外やテラヘルツ域の光の周波数となります。従って、電波と光のギャップの電磁波を制御するのに有望です。10ナノメートル級の薄膜材料の場合には、基底状態と励起状態の振動数の差は0.1電子ボルトぐらいの値となり、その振動数差に対応する赤外光を強く吸収します。こうした性質を使うと、赤外光やテラヘルツ光領域の検出器や発光源として魅力的な特性が実現さ

れます。ちなみに、検出器として利用するには超薄膜の層状構造の上下に電極をつけた素子を作ります。波長10ミクロンの光が電子を励起準位 $E_2$ に上げるたびに、膜を横切る電子が増し電気伝導率が増えるわけです。この素子の原理は小生と江崎先生とが1977年に提案したのですが、80年代にベルの研究者が見事な実験を展開して実現されたものです。高速の応答が可能であることや感光波長の選択性を制御しやすいなどの性質もあり、その利点が確立しています。特に様々な気体の吸収ラインを検出できることや画像計測も可能などの特色もあり、ユニークな展開を遂げています。

光検出とは逆に励起レベルから基底レベルへの電子の遷移プロセスを使いますと、10ミクロン付近での発光が得られます。これもベル研究所の人たちの努力で研究が進み、波長5ミクロンから、130ミクロンの波長域で動く優れたレーザが出てきています。

現在では、開発費が上乗せされているために相当高い値段がついているようですが、開発したカパソさんと雑談をした際に、材料はCD用レーザと似たものなので、大量生産されれば、数百円程の値段の素子もいずれ可能となるだろうということでした。赤外の分光は環境計測や医療計測にも利用できますが、そうした光源が身近に利用できるようになるわけですから、先取りして様々な応用システムをつくっていくことが大事でしょう。このように、ナノ構造のセンシング応用の魅力の一つは、波長選択性やエネルギー選択性があり、中赤外や遠赤外域で様々な利用のできることです。

### 量子ドットおよび単電子構造の究極的感度

量子ドットや単電子素子用の小さな島状の半導体に単一の電荷を近づけるとか、一つの光子を送り込めば、このシステムは乱されます。乱されたことを電氣的または光学的手法で検出すれば究極の感度のセンサーとなります。乱された際に発生した電荷を蓄積するための領域を小さくすることが肝要です。量子ドットや単電子素子を埋め込んだいろいろな素子が登場しており、こうした究極の感度を持つセンサーの開発が重要になるでしょう。

量子ドットとして究極的に小さなものを作る手法として、1ナノメートル程のカーボンナノチューブをみじん切りにする手法など様々な方法が試みられています。またそれよりも少し大きな十ナノメートル程のものもいろいろな手法でつくることが可能となってきており、そうした手法を十分に活用することが重要です。

先ほどナノチューブに切り込みを入れると室温で動くすばらしい単電子素子ができるとの話がありました。逆に中央の電荷の島をやや大きめにすると、室温動作が困難になります。しかし、そこではエネルギーが準位密集するため

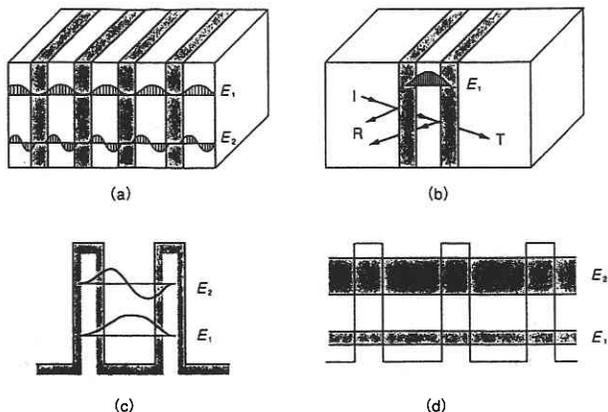


図3 超格子(結合した量子井戸)(a)と二重障壁層を隣接させた共鳴トンネルダイオード(b)の構造、共鳴トンネルダイオードのポテンシャル分布 $V(z)$ と量子準位( $E_1, E_2$ )(c)、超格子内の周期的なポテンシャル分布 $V(z)$ と量子井戸間の結合で生じたミニバンド( $E_1, E_2$ )の模式図(d)。Iは入射波、Rは反射波、Tは透過波を示す。

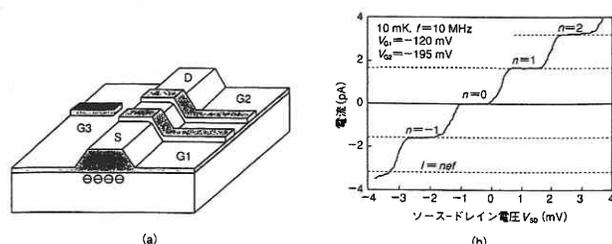


図4 単電子トランジスタの一例 (a) とこれを用いたターンスタイル (回転扉) 動作による単電子転送特性 (b). ソースドレインに電圧  $V_{SD}$  を加え、同時に入口側と出口側のゲート (G1 と G2) を交互に開閉すると、電子群が毎回  $n=1$  個または  $n=2$  個ずつ転送される。このため  $nef$  ( $f$  は毎秒の開閉数) の電流が流れる。

に、マイクロ波とかミリ波と共鳴する量子状態ができ、そうした波長域に感度をもつ究極的な素子ができます。ですから、サイズをいろいろ調整して、様々な波長に対応できる素子を用意すべきと考えています。100 ナノメートル級のドットでは、数十ギガヘルツのマイクロ波に共鳴的に応答する素子が得られます。すこし小さくすれば数百ギガヘルツ帯の応答が得られます。

さてドットの荷電状態が変化したときに、それを検出するための一番いい方法はなんでしょうか。既に議論されたように、図4に示す単電子素子 (SET) をドットの近くに置くとドットの荷電状態で SET の特性が大きく変化します。従って、量子ドットと単電子素子を組み合わせた構造が、これから非常に重要になると思われます。

事実、小宮山進先生は単電子素子の近くに量子ドットを隣接させて、ドット内の電子数をマイクロ波の光子ひとつで増減させ、その変化を SET で検出しています。

最近の研究によりますと、ドットの近くに量子細線トランジスタを置くと、ドットの電荷状態で伝導特性が変化するため、単電子の素子と同様に、高感度センサーとなることが指摘されています。つまり、量子ドットや細線を巧みに利用すれば、究極のセンサーとなることを強調しておきます。特に、先に話の出た自己形成手法で作られるドットは、多様なものが得られ魅力的です。例えば、インジウム砒素よりも大きめのインジウムリンのドットを用いると、エネルギーの準位の間隔が10 ミリ電子ボルトぐらいになるために、1 テラヘルツ付近の電磁波と共鳴し信号検出に利用できることが示されています。

### ドットのバイオ医療応用

小さなドットは液体の中に分散できるので生体内に届けられることがもう一つの魅力です。小さなドットを生体内の中に送り、特定の組織に吸着させ、その発する蛍光を用いてマーカーに利用する可能性があります。こうした体内の医療計測にも大きなポテンシャルを持つことは広く認識

されています。特に、種々の寸法の量子ドットが色合いの違う光を出すので、これをセンシング用のマーカーとして活用する研究が米国で非常に盛んです。日本でも関連の研究が始まっています。

具体的には、小さなナノ結晶を含んだガラスビーズを体中に入れ、がん細胞に、抗原抗体の関係で取り付くよう修飾をしておきます。こうすれば、ある病巣部にだけ特定の蛍光を出すマーカーが付きまます。検出に加えて薬の薬理作用を患部だけで活性化するドラッグのデリバリーの新手法にも使えるわけです。小さな材料が体内のいろんなところに届くことを巧みに活かせば医療の面で大きな展開をしましょう。

### 量子情報処理とナノ構造

最後に量子情報処理の話をしませう。量子コンピューティングだけでなく、暗号のための鍵情報を盗聴の心配なく配るための方式への応用が検討されています。多くの方式が提案されていますが、後者の応用では単一の光子を発生させたり、検出する素子の重要性が広く認識されています。

小さなドット構造の中に電子とホールを一つずつ入れれば、一つずつ光子が出てくるわけです。量子ドットの発光源への応用には様々な利点がありますが、そのひとつは量子的な通信システム用の光源です。スタンフォードの山本先生たちの研究も、そこに照準を当てています。量子通信システムで単一光子光源が必要とされていて、量子ドットを使う方式が有望視されているだけに、関連の技術開発が大変に重要になると思います。

他方、量子コンピューティング用の基本素子である量子ビットの実現手段としては、10種類に近い方式が試みられていますが、それぞれ利点と欠点を持ち合わせています。その中で、二つは量子ドット内の電子の電荷やスピンの状態を利用する方式です。これらの試みでは、量子ドットの中の電子が、どれだけの時間、コヒーレントな量子状態を維持するかが大事です。特に、量子ドットの中の電子が、上の準位から下に落ちたり、トンネル効果で移動する過程を制御する必要があるわけです。現在のところ、スピンの反転を伴うプロセスは非常に寿命が長く、1 ミリ秒ぐらいになるとの指摘もあります。いずれにせよコヒーレンスを乱すプロセスをきちんと見極めて、それを制御して、寿命をどこまで長くできるかを明らかにし、制御するのが重要課題です。

さて、InAs などのドットにおいて上の準位から下に落ちる過程は、ものすごく早いというのが大方の理解でした。2年前、われわれも共同研究をしているフランスの研究グループは、上から下に落ちる際のエネルギーの間隔が結晶の格子振動の光学モードのエネルギーに近い場合を調べ、格子振動つまりフォノンを放出して落ちた電子は、そのエ

エネルギーを再吸収して上の準位に戻る確率が高く、その結果振動的な状態となることを実験的に見いだしています。つまり量子ドットの中の電子と格子振動は、結合したシステムとして理解しなければいけないことを示しています。電子的な部分だけではなく、格子振動がどういう寄与をしていくかも理解して制御する必要があるわけです。

先の講演で、ラマン散乱の手法で、アイトープの格子の振動の様子が制御できるとの話がありましたが、ナノ構造の中では電子や光の制御に加えて、格子振動や核スピンの制御ということも視野に入れるべきと思われます。

### む す び

以上で私のお話を終わらせていただきます。ナノテクノロジーの対象とする領域は極めて多彩です。それぞれの領域で何を目標として研究を進め、それをどんな時間スケールで推進するかを吟味し、社会に正しい展望を提供しながら研究することが重要です。特に21世紀の人類が健康で質の高い生活を享受できる社会を実現するために、ナノ構造の潜在可能性を掘り出して活かしてゆくことが我々に与えられた大きな課題であると考えております。

ご清聴ありがとうございました。

#### □質疑応答

○質問 光の粒子の発生をコントロールする手法について具体的に教えてください。

○榊 小さな量子ドットに両側に電線をくっつけて、一方から電子を入れ、他方からホールを入れる仕組みで行いま

す。具体的には、PN接合の中央にドットを埋め込んでおくと、ドットの中に入った電子ホールとが結合して光の粒(光子)がひとつ発生するわけです。そのとき電子とホールを一個ずつ一定の間隔で入れるようにすれば、光の粒(光子)の出るタイミングまでもを外から流し込む電流によって制御できるのです。

○質問 電流によってコントロールするわけですか。電子を制御するというのは。

○榊 光を一粒ずつ出すには、ドットに電子を、ランダムに入れてしまわず、一つずつ流し込まなくてはならない。幸い、ドットに電子を1個入れると、その斥力で2個目が入りにくくなる性質があるので、これを使うと1つずつ入れることが可能となります。

○質問 小柴先生がやってらっしゃるニュートリノで電子を制御する可能性はどうなんでしょうか。

○榊 ニュートリノは、電子を含めて他の物質と相互作用がしにくいものです。従って、信号の発生の確率が極めて低くなり、制御手段としては効率が悪いものとなると思います。他方、半導体中の物質の原子核のスピンの状態を電子で制御する試みは活発化しており、エレクトロニクスが電子だけでなく核の状態まで利用する段階に拡大する時期にあると思います。これが発展すると、原子核はエネルギー利用に留まらず、情報技術への応用まで伸びる可能性があります。

(了)