



材料に秘められし可能性を求めて

南研究室～応用物理学科



南 不二雄 教授

光コンピューター。現存するコンピューターをはるかに凌ぐ速度で動作する可能性を秘めた、究極のコンピューター。その開発を目指して現在様々な研究が進められている。しかし新しい素子の作成にも、既存の材料では限界がある。新しい材料が必要とされているのだ。

例えば材料の構造を変えることで新しい素子を作る可能性を見出すことができないか、光で電子に刺激を与えたときどのような挙動を示すのか、などの材料の性質に関わる研究。南研究室ではこのような、形のあるものを作る足がかりとなる研究を行っているのである。



レーザーをいかに使うか

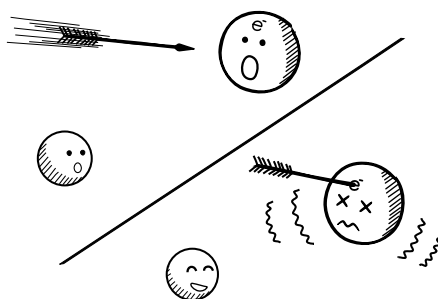
南研究室では、ほんの一瞬の光を用いることで半導体の中を「覗いて」いる。一瞬といっても、 10^{-15} 秒～ 10^{-12} 秒といった、「超瞬間」ともいえる程のオーダーである。ストップウォッチで計れるのがせいぜい 10^{-3} 秒であることを考えれば、「超瞬間」という言葉にも納得していただけるだろう。

では、この超瞬間的な光をどのように使って半導体の中を覗くのだろうか。瞬間的な光ということで、ストロボを思い浮かべていただきたい。物体が暗いところを高速で動いているときストロボで瞬間的に照らし出すと、物体は一時的に止まって見える。何度も繰り返し照らし出せば、物体がどのように動いたのかが、ある程度は想像ができる。超瞬間的な光を使うと、これと同じようなことを電子に対して行うことができる。電子のエネルギーや位置などが、時間とともにどのように変化したかを調べることができるのだ。しかし、光を1度だけ当てても、得られる情報には限度がある。

そこで超瞬間的な光をもう一つ使うことを考えてみよう。現在は、電子や光が粒子と波動の両方

の性質を合わせ持つことが確かめられている。特にレーザー光線は波動として非常に規則的な振動をしている。そこで、超瞬間的なレーザー光を一度物質に当てるとしよう。するとこのパルスを受けて、半導体の電子がこの振動を真似るのだ。レーザーのパルスが持っていた情報(振動数、入射方向など)が全て電子に引き継がれるわけである。

ここにもう一度パルス当てるとどうなるだろうか。図1を見ていただきたい。電子をバネにつけたおもりに、レーザーのパルスをそれに与える



衝撃にたとえたものである。バネを一度たたくと振動を始める。次にバネをたたくときは、その時間差によってバネの状態が図1 a), b)のように違うことがある。最初の衝撃による振動と次の衝撃が互いに干渉するので、そのときのバネの状態によってその後の振動が別のものになってしまう。電子の振動でも同じ現象が起こるのだ。1度目のレーザーの情報を持った電子と2度目のレーザー、2つの波動が互いに干渉して電子の振動をさまざまに変える。2度目のレーザーを当てるタイミングや方向を調節すれば、電子の振動を制御することができるのだ。うまく制御できれば、その半導体がレーザーや発光ダイオードなどに使えるか否か、などという電子の動きにかかわることを調べることができる。

しかし電子に与えられたパルスの情報は、周囲の様々な要因によって乱されてしまうという問題がある。半導体では、原子が格子状にほぼ規則正しく並んでいるが、その規則性が破れているとこ

ろもある。このようなところは欠陥と呼ばれているが、これが曲者なのだ。というのは、電子はある特定のところで振動しているわけではなく、半導体の中を常に動きまわっているからだ。その途中で欠陥にぶつくと、その時の衝撃によって電子の振動が乱され、それまで持っていたパルスの情報が消えてしまう。

また、物質には温度というものがあり、その正体は原子の振動である。電子は原子を避けて進もうとしているのだが、原子が振動しては避けきれずにぶつかってしまう。すると、やはり同じようにパルスの情報が乱されるのである。1つ目のパルスの情報がこのように乱されて変化してしまうと、2つ目のパルス当てたあとの電子の振動も変わってきてしまう。このような変化の有無を調べることで、南研究室では電子がいつ欠陥や振動する原子にぶつかったのかを解明しようとしている。

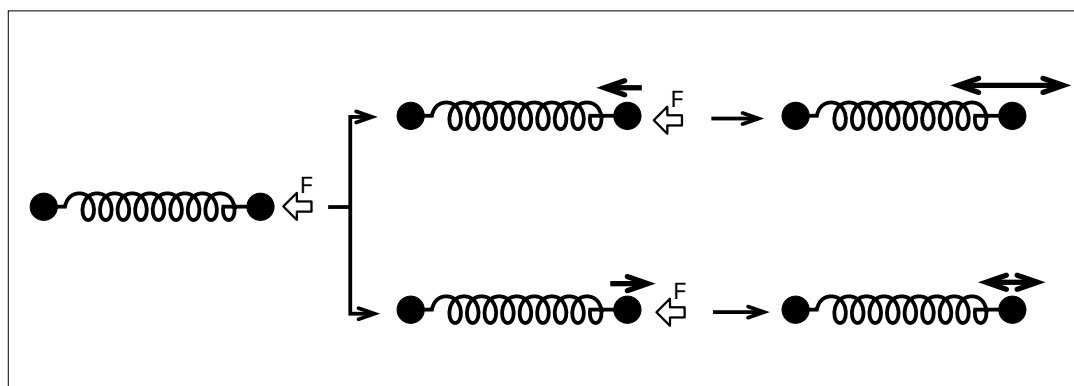


図1 バネの振動では...



次元下がりって上がるエネルギー

2次元系という世界がある。この系に電子を入れると3次元系の時とどのように違うのだろうか。そもそも、ある平面の中しか動くことのできない世界を3次元の物質でどうやって作るのだろうか。

それは、図2のようにあるAという物質を別の物質Bで挟むのである。Aを薄くすると、中の電子がそこに閉じこめられて、厚さ方向の移動がいっさいできなくなるのだ。Aの厚さが $100 (1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-10} \text{ m})$ 以下になると、このような現

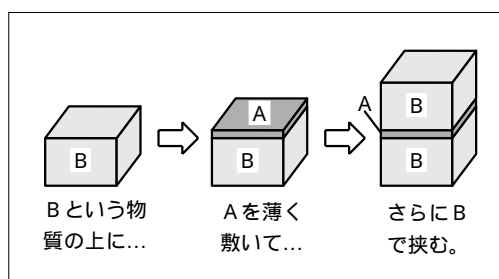


図2 電子を2次元に閉じこめるには

象が起こる。電子波の波長がちょうどこれくらいのオーダーだからだ。ただ、物質A、Bはどのような物質でもよいわけではない。少し説明を加えることにしよう。

まず、原子の周りを取りまく電子のエネルギー状態は電子波が定常波であるようになっていて、エネルギーの値は状態ごとに決まった値しかとらないようになっていて。しかし原子が集まって固体になると、単体の時とは少し違った形を見せる。図3のように、連続的ではないものの、非常に接近したエネルギー状態がまるで何本もの線を束ねた帯のようになるのだ。このように近接したエネルギー状態でできた帯のことをエネルギーバンドと呼び、帯と帯の間にある空白の部分バンドギャップと呼ぶ。そして、電子が完全に詰まっているエネルギーバンドのうち、もっともエネルギーが高いものは価電子帯、そのひとつ上にあるエネルギーバンドは伝導帯と呼ばれている。

では、物質BでAを挟むことを考えよう。AとBの選び方次第で、価電子帯と伝導帯の形は図4のようにすることもできる。伝導帯の形が井戸のようになり、ここに入った電子は物質Aの中に閉じこめられるのである。このようにして電子は2次元に閉じこめられるのである。

さて、エネルギーの大きさはAの厚さ x にどのように対応するのだろうか。

電子を波として考えると、2次元系では両端を固定させたひもを振動させたときと同じく、AとBとの境目を両端とした定常波となる(図5)。 n 番目のエネルギー状態では腹が n 個、という状態になっているのだ。これより電子波の波長は $2x/n$ と表せる。波動の持つエネルギーは E に

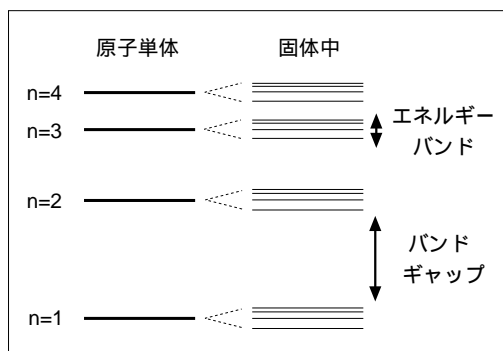


図3 エネルギー状態が帯をつくる

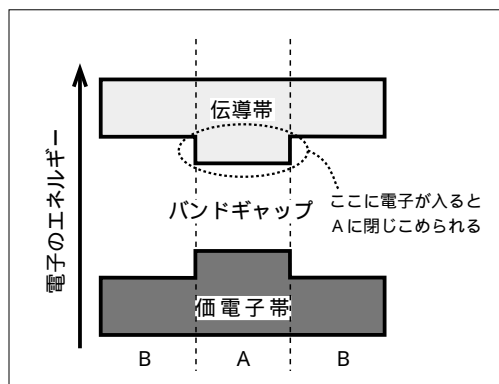


図4 伝導帯にできるエネルギーの井戸

反比例するので、 x が小さくなると、それに応じてエネルギーが大きくなるのだ。これは、Aの厚さを調整することによって電子のエネルギーレベルを自在に、かつ正確に制御できることを意味する。

このように電子のエネルギーレベルが制御できると、どのようなことができるだろうか。主に次の3つが挙げられる。

- (1) 同じ半導体を使いながら、何種類ものエネルギーレベルを作り出すことができる。
- (2) 任意のエネルギーレベルを自在に設定することができる。
- (3) 自然界の半導体にはなかった全く新しいエネルギーレベルを実現することができる。

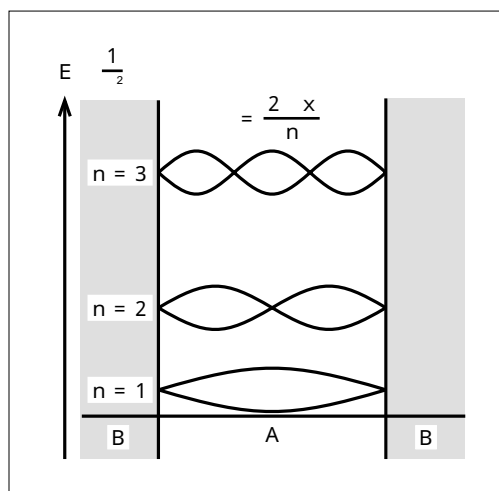


図5 電子もひもと同じ

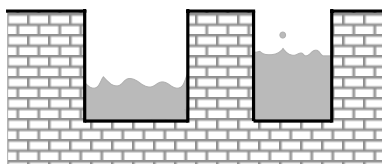
ここで、半導体レーザーを例として考えてみよう。レーザー光とはある特定の波長の光だけを集めたものである。また、光はエネルギーの値を色として見せてくれる。よって、上記 (1) ~ (3) に対応して以下のことができるのである。

- (a) 同じ半導体でも、様々な色のレーザー光を出すことができる。
- (b) レーザー光の色を望み通りに変えることができる。
- (c) 自然界の半導体では不可能だった色のレーザー光を出すことができる。

ただ、どんな半導体でもレーザー媒質として使えるわけではないので、そう簡単に (a) ~ (c) が

実現できるわけではない。

ところで、ここまでは2次元系の話をしてきたが、1次元系や0次元系といったものも研究されている。特に0次元系は、電子のエネルギーレベルを自在に設定できるだけでなく、自然界に存在する半導体のように扱うことができる。そのため、半導体にとって代わるべく盛んに研究が進められているのだ。



そして何ができるのか

このように、光で電子の振動を制御したり、材料の構造を変えることによって電子のエネルギーレベルを制御したりすることができる。その目的は、現在のコンピュータの高速化から光コンピュータの開発まで、幅広いものである。今のコンピュータは電子で様々なことを制御しているが、光コンピュータでは電子の担う役目を光に引き渡そう、というわけである。

例えばメモリである。もし原子1つだけを用いて基底状態ならば0、励起状態ならば1というようにデータを記憶できるとしたらどうだろう。物質には1mol 当たり 10^{23} というオーダーで原子が詰まっているのだから、現存するメモリなど到底及ばぬ大容量のメモリができることになる。

半導体メモリを作る場合にも、次のようなことを考えることができる。電子のエネルギーレベルが自由に制御できるのならば、波長が短いレーザー光を出すことができるようになる。波長が短いレーザー光を用いれば、半導体に細かい加工を

施すことができるので、大容量のメモリを小さく作れるわけである。

細かい加工ができれば、他の様々な素子も小さく作れるようになる。そうすると電子の移動距離が短くて済むようになるので、光を使わなくても今のものより速いコンピュータができる可能性がある。速さを追求するだけならば光に頼ることもあるまい、という考えもあるほどだ。

しかし、光コンピュータの特徴はその速さだけではないのだ。光を用いれば、CPUによる並列処理とは全く違った手法で情報を「超並列処理」できる。コンピュータには進化する余地がまだまだたくさん残っているのだ。

南研究室の研究は、光、電子、原子などの性質、本質に迫ってその正体をもっとよく知るためのものである。このような研究があつてこそ、光コンピュータの可能性が現実近づいていくのである。

南研究室では各人が1テーマずつ研究をされているそうで、伺ったお話は非常に多岐にわたるものだった。今回は紙面に限りがあるため、その中から2つほど紹介させていただいたが、伺ったお話はすべてがそれぞれ興味深いものであった。それを

すべて記事にできなかったことが残念でならない。

最後になりましたが、急な取材の依頼を快く受けてくださった南教授にこの場を借りて御礼申し上げます。

(高松 雅士)