



電子を操るナノの技

青柳研究室～物理情報システム創造専攻



青柳 克信 教授

原子1個でもない、アボガドロ数個でもない世界。それがナノの世界だ。ナノの世界では、今までの世界とは全く異なった物理現象が現れる。それらの性質から有用な性質を引き出し、実用化する。それがナノテクノロジーである。

青柳研究室では、ナノテクノロジーの中でも電子の振る舞いに的を絞ったナノエレクトロニクスをテーマに掲げ、研究に取り組んでいる。電子を制御することは、新しいデバイスへの応用に繋がるのだ。今回、青柳教授には研究内容とナノの魅力について語っていただいた。



電子が可能にする量子計算

現代社会では、日々大量の情報がネットワーク上を流れ、やりとりされている。その大切な情報を守る鍵となるのが暗号化技術だ。現在最も広く使われているRSA暗号は、コンピュータが苦手とする素因数分解に基づいている。これを解読するには膨大な時間がかかり、絶対に破られることのない暗号と認識されていた。ところが1994年のある発表が世界に衝撃を与えた。ベル研究所のショアが発表した「因数分解アルゴリズム」には、量子コンピュータの持つ並列性を使えば素因数分解がわずかな時間で解ける、すなわちRSA暗号が解読されてしまうことが示されていたのだ。この発表がきっかけとなり、世界中の研究者達が量子コンピュータの新たな可能性を見出し、その開発へと乗り出していくこととなった。

では量子コンピュータが有する並列性とはどういうものであるか。コンピュータで計算するには、まず扱いたい情報を0と1の列に置き換える。次にその情報列を論理回路に作用させて計算を行う。従来のコンピュータでは、情報列の最小単位をビットと呼ぶ。1つのビットでは0か1のどちらかの値しか取ることができない。つまり1回の

入力では1通りの情報しか表すことができない。一方、量子コンピュータでは情報列の最小単位をキュービット(量子ビット)と呼び、量子力学的な確率状態を用いる。ここに暗号解読をするために用いられる並列性の秘密がある。

その量子力学的な確率状態を実現させるために青柳研究室が利用しようとしているのが量子ドットと呼ばれるものだ。量子ドットとは、電子のド・ブロイ波の波長と同程度の大きさを持つ、電

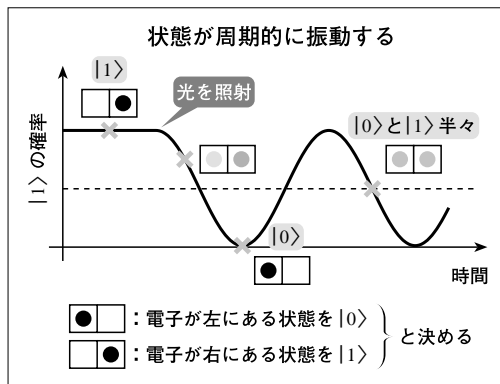


図1 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の間の共鳴

子を閉じ込める箱のことで、この中に閉じ込められた電子は量子力学的な振る舞いをする。キュービットは2つの量子ドットを近づけ、そこに電子を1個入れることで作られる。電子が左の量子ドットにいる状態を $|0\rangle$ 、右にいる状態を $|1\rangle$ とする。実際にキュービットを実現するには、重ね合わせの状態を作り出さなくてはならない。そこで、 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ のエネルギー差に等しい光をキュービットに照射すると、キュービットは $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の間を振動する。これが共鳴と呼ばれる現象である(図1)。ある時間で光を止めると、重ね合わせの状態が出来上がる。この重ね合わせの状態は、次のような式で表すことができる。

$$a|0\rangle + b|1\rangle$$

この式は $|0\rangle$ である確率が $|a|^2$ 、 $|1\rangle$ である確率が $|b|^2$ ということの意味する。このように1つのキュービットで $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の2通りの可能性があるため、 n キュービットならば1回の入力で 2^n 通りの情報を扱うことができる。これこそが量子コンピュータの並列性である。

青柳研究室の方法では、ド・ブロイ波の波長と同程度の大きさの量子ドットを作らなければならない。電子のド・ブロイ波の波長は約10ナノメートルである。ここで青柳教授は以前にも取り組んだことのあるカーボンナノチューブ(CNT)に目を付けた。CNTの太さは約10ナノメートルである。そのため長さを調節するだけで量子ドットとして用いることができるのだ。図2のようにCNTの上にSiO₂を積層させてエネルギーの壁を作る。そして電極とCNTの間のトンネル接合を通し、単一電子効果を用いて、ゲートによりキュービットに電子が1つ入るように、CNTのポテンシャルエネ

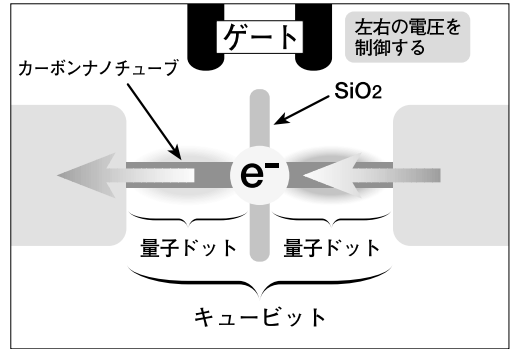


図2 青柳研究室で作られている量子ドット

ギーを調整する。

だが、キュービットを作るには実験的困難が伴う。実際に共鳴を起こし、重ね合わせ状態を実現するには、正確に $|0\rangle$ と $|1\rangle$ のエネルギー差分を持つ光を当ててやらなければならないからだ。

ところで、青柳教授はキュービットを完成させた次の段階として、量子コンピュータに欠かせない論理演算回路、制御ノットの実現についての具体的な構想を持っている(図3)。制御ノットを作るには、まず2つのキュービットを用意する。するとエネルギー状態は図3(a)ようになる。ここで2つのキュービットが独立と考えると図3(a)左のようになる。ところが、キュービット間に相互作用を起こさせるとそれぞれのエネルギー準位が図3(a)右のように変化する。ここにちょうど $E_b - \Delta E$ の光を当てると $|1\rangle|0\rangle$ と $|1\rangle|1\rangle$ の間でのみ共鳴が起きる。この2つの状態を振動する周期がわかり、図3(b)のように振動のちょうど半周期の時間で光を止めれば、制御ノットが実現できるという仕組みだ(図3(c))。

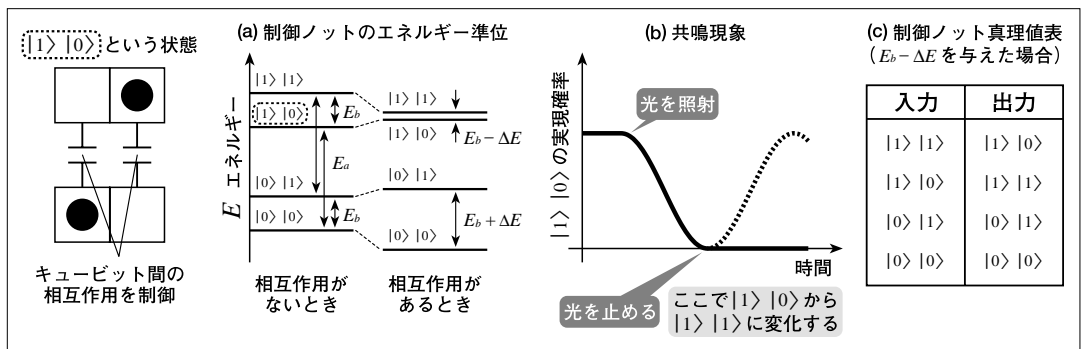


図3 制御ノット

理論的には以上のようなことだが、1キュービットが完成していないことからわかる通り、共鳴させる際に正確にエネルギー差分の光を当てなければならぬということや、振動のちょうど半周期で光を止めなければならぬという時間的な制御などまだまだ実験の難題は多く、量子コンピュータの研究は第一歩を踏み出したばかりだと言える。

世界中で量子コンピュータの実現に向けて競われている中、「私が研究している方法は実用化に

最も近い」と青柳教授は語る。実際に、量子コンピュータで計算するためには、数百から数万個のキュービットが必要だと言われている。しかし、集積化すると、計算結果の観測が困難になってしまうのだ。現在キュービットが実現されている研究グループがあるが、いずれもキュービットの数が増えると観測が困難になるという問題を抱えていて、高集積化には制約がある。このような中、青柳教授の方法は観測が容易であり高集積化できるという強みを持っているのだ。



より短い波長を目指して

青色半導体レーザーの発明は産業界に大きな影響を与えた。青色のレーザー光線は波長が短い。それゆえDVD等の光ディスクの高集積化を可能とした。そして現在、青柳研究室が研究しているのは、更に波長領域の短い深紫外光線を出す半導体レーザーである。この波長領域のレーザーが実現されれば、光ディスクの更なる高集積化が望める。それだけではなく、深紫外光線はエネルギーが高いという特長を活かし、光触媒や殺菌灯など様々な分野への応用が期待でき、産業の発展に大きく貢献することになる。青柳研究室ではこのように有用な深紫外レーザーの研究にナノの技術を用い取り組んでいる。

半導体レーザーは電子を過剰に含むn型とホールを含むp型を組み合わせて作製される。電子を作るためには材料の他にドナーになる原子を、ホールを作るためにはアクセプタになる原子を入れる。こうして出来上がった電子とホールがぶつか

った時に光を出すという仕組みだ。より強い光を出すにはより多くの電子とホールを結合させてやればよい。しかし、深紫外レーザーを実用できる段階にまで開発するには、技術的に越えなければならない幾つかの大きな壁があった。

深紫外領域の光を出す半導体はAlGaInやGaInを原料に作られる。この半導体はアクセプタ準位が高いのでホールが十分に生成されず、発光が妨げられていた。そしてこのことは長年研究者たちの中で解決不能な問題として考えられてきた。ところが、今から数年前に「半導体の中にドナーとアクセプタからなる複合体を作れば、アクセプタ準位が下がりホール濃度が上がる」ことが理論面で示された。これは深紫外レーザー実現の可能性を示唆する発表である。世界中の研究者たちはこの発表を受けて、Si(ドナー)とMg(アクセプタ)などといった組み合わせにより複合体を作ろうと試みたが、期待に反してホール濃度を上げることができなかった。他の研究者たちの研究手法に対し、青柳教授はSiとMgの混ぜ方に問題があるのではないかと考えた。従来の方法では半導体のベースとなるGaなどに比べて、SiやMgの数が少ないので実際には複合体がほとんどできないのだろうと予想したのだ。この仮定をもとに、青柳教授は新しい複合体の混合法を考え出した。まずGa(CH₃)₃、Al、N₂ガスを入れる。次にSiとMgだけを入れて、そこで複合体を作ってしまう(図4)。つまり、バラバラに存在していたSiとMgを一ヶ所にまとめることでより多くの複合体を作ろうと考えたのである。この操作を何回も繰り返し、何層も積み重ねることで、ホールの濃度を従

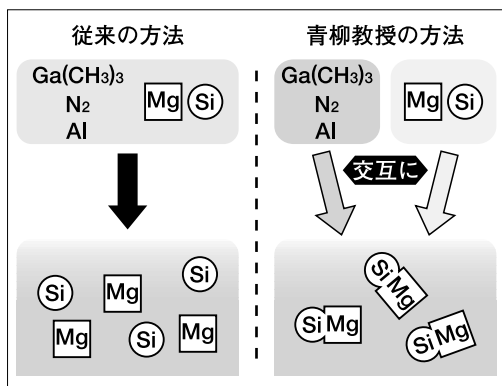


図4 深紫外発光のための半導体素子

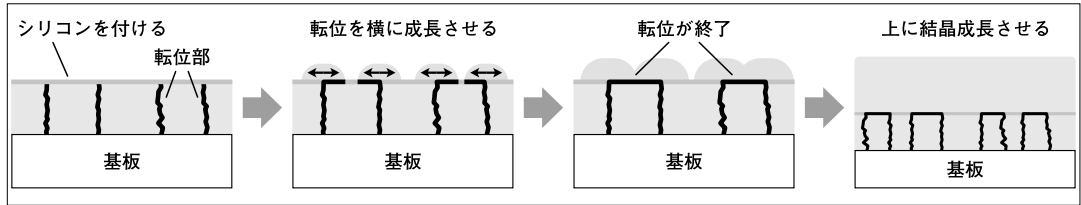


図5 転位を広げないために

来の方法の100倍近く上げることに成功した。

ホール濃度を上げることはできたが、発光させるためには、ホールと電子が結合しなければならない。しかし、それを妨げる要因の1つに「転位」があった。そもそもGaNなどは結晶を作る際、SiCやAl₂O₃といった特定の基板の上にしか成長できない。ところが、基板と結晶の格子定数(原子間の距離)には大きな差があるので基板の上に結晶を成長させると歪みが生じ、やがてひび割れが起きる。これが転位と呼ばれる現象である。転位があると電子が転位部に落ちて結晶格子を揺らすフォノンと呼ばれるエネルギーになってしまうのだ。転位をそのままにしておくと結晶成長と共に転位が広がってしまい、結果としてたくさんの電子がフォノンになり、発光の妨げになって厄介である。そこで青柳教授は非常にユニークな方法で転位の問題を解消した。

まず、Siを結晶の表面に付ける。するとSiが転位の箇所をエネルギー的に安定させてそこに止まるのである。更に温度などの条件を変えて結晶成長させると転位は横に成長する(図5)。そうして転位同士を繋ぎ、ループ状にすることで転位が上に成長することを防ぐことができる。実際青柳研究室では、この方法を用い転位の量を従来の1/100に抑えることに成功した。

転位を解消するだけでは、実際は不十分である。電子はホールと結合する際、半導体からホールを見つけなければならない。ホールを見つけることができなければやはり、電子はフォノンへと変わってしまうのだ(図6左)。この問題を解決する鍵を握るのが量子ドットである。量子ドットがあることによって電子は量子ドットに閉じ込められ、図6右のように電子とホールがお互いを見つけて、強い発光を実現させることができるのだ。

半導体レーザーは多層構造をしており、基板の上に本体となる結晶を何層も成長させて作る。深

紫外レーザーより長い波長の半導体レーザーは、その層となる結晶同士の格子定数の差を利用している。格子定数の差が大きいため、その違いを緩和しようとして量子ドットが自己形成されるという仕組みだ。ところが、深紫外レーザーでは二層間の格子定数の差がほとんどないため、量子ドットを自己形成させることができなかった。

多くの研究者は、量子ドットを自己形成させることは不可能と諦めていた。しかし、青柳教授はこの常識を打破したのだ。そのヒントは意外なところにあった。テフロン加工のフライパンは皆さん知っているだろう。テフロン加工のフライパン上に油を乗せると丸まってしまう。この現象はテフロン加工のフライパンの面が安定しており油が面に広がるより丸まっていた方が安定であるために起こっている。青柳教授はこの現象から量子ドットを作る方法を思い付いたのであった。つまり下の結晶層(フライパンに対応)の表面エネルギーを下げることにより、量子ドット(丸まった油に対応)を作ろうとしたのだ。このようにして、青柳教授は格子定数の差が小さい場合に量子ドットを作る方法を考え出した。

深紫外レーザーの今後の課題はこれらの技術を組み合わせることである。更に言うと、青柳

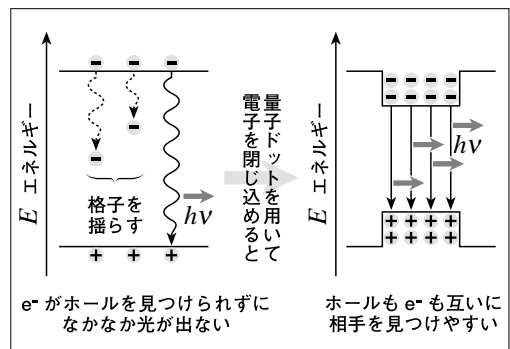


図6 量子ドットを使った効率の良い発光

研究室では現在Al含有率が0.1%程度のGaN系で実証が済んだ段階である。そして、レーザー光線が深紫外領域の波長を達成するためには、Alの含有率を50%程度にまで増やさなければならない。ところがAlの含有率を増やすと、結晶を作る際に高温になり、室温に戻したときに転位が生じてしまうといった問題を抱えている。このように3つの壁を乗り越えた半導体レーザーであるが、まだ未解決の問題は残っている。これらの諸問題が解決される近い将来、深紫外領域の波長を出すレーザーが手軽に使われる時代は訪れるだろう。

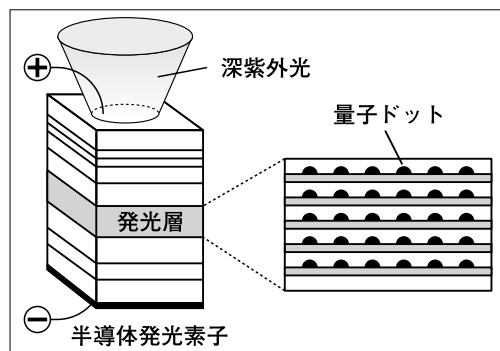


図7 半導体素子の実際の様子

ナノの世紀を迎えて

2000年のクリントン前大統領による「国家ナノテクノロジー計画(NNI)」の演説は、21世紀がナノの世紀だと世界に印象づけることとなった。しかし青柳教授は、世界がナノテクに注目する前から、CNTや電子1個で情報のやりとりをする究極のデバイスである単電子デバイスの研究に取り組んでいた。その意味で青柳教授はナノテクノロジーの先駆者と言えるだろう。

「私はアイデアで他に勝っていると感じています」とは青柳教授の言葉だが、今までの常識に囚われない独創的な発想で青柳教授は研究を進めている。例えば、半導体発光デバイスにおける量子ドットは格子定数の差を利用して自己形成するものだというのが世界中の研究者の常識だった。そして、その常識こそが半導体デバイスによる深紫外レーザーの実現に近づくことができなかった最も大きな原因であった。しかし、青柳教授はその常識を打ち破り、格子定数にほとんど差がなくても量子ドットが形成できることを証明したのであ

る。しかも驚くべきことは、テフロン加工のフライパン上の油滴が丸まるという、誰もが知っている非常に身近な現象から着想を得たということである。人まねをしないオリジナルな発想。これこそが青柳教授が研究に取り組む際に一番重要だと感じている点であり、研究の原動力になっているのだ。このエピソードからだけでも、青柳教授が独創的な発想力と、身近に潜んでいる物理現象を常に注意深く観察しているということが窺える。

青柳研究室の研究テーマの幹はナノエレクトロニクスであるが、実はその技術が確立すれば、応用範囲は何もエレクトロニクスだけに止まらない。例えば、生物、有機化学、機械工学など数え上げたらきりが無い。それほどまでに有用な技術なのである。

「研究のゴールは常に豊かでなければならない」。その言葉通り、現在、青柳研究室で精力的に取り組まれている研究の先には新しい産業が待っているに違いない。

「人が実現していないものを実現する。それが楽しい」。そこに青柳教授の研究者としての原点を感じた。

最後になりましたが、お忙しい中重なる取材

や質問に応じて下さり、また様々な資料を提供して下さいました青柳教授をはじめ、研究室の皆様にご場を借りて厚く御礼申し上げます。

(住 彩子)

参考文献

- 池澤直樹 著 「ナノテクが日本を救う」 講談社 (2002年)
- 広田修 著 「量子情報科学の基礎量子コンピュータへのアプローチ」 森北出版株式会社 (2002年)
- R.タートン 著, 川村清 監訳 「量子ドットへの誘い - マイクロエレクトロニクスの未来へ - 」シュプリンガー・フェアラーク東京 (1998年)