

Title	半導体と光技術に量子力学の原理を応用 : "0でもあり1でもある世界"の可能性
Sub Title	
Author	田井中, 麻都佳(Tainaka, Madoka)
Publisher	慶應義塾大学工学部
Publication year	2011
Jtitle	新版 窮理図解 No.7 (2011. 8) ,p.2- 3
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	研究紹介
Genre	Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO50001002-00000007-0002

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

半導体と光技術に量子力学の原理を応用

“0でもあり1でもある世界”の可能性

原子や分子、電子、素粒子などの非常に小さな世界で起こる、古典力学では説明しきれない現象を扱う量子力学。理論の確立から1世紀近くを経て、実験によってその正しさが証明され、いまや人類が活用できる技術へと進歩を遂げつつある。早瀬潤子准教授は、光と半導体の量子力学的性質を制御する技術を開拓し、量子光エレクトロニクスの実用化に向けた研究に取り組んでいる。

パルス光と半導体を組み合わせて新技術を創る

「量子力学の最大の応用技術として注目されるのが量子情報技術です。量子力学的性質を活用できれば、遠く離れた場所へ一瞬で情報を伝える量子テレポーションや、現在のコンピュータでは何億年もかかる問題を超並列計算で一瞬にして解く量子コンピュータ、決して盗聴できない絶対安全な量子暗号システムなど、従来の情報技術では想像もできなかったようなことが可能になるのです」と早瀬潤子准教授は言う。

早瀬さんの専門分野は量子光エレクトロニクス。パルス光（一瞬だけ光るフラッシュのような光）と半導体ナノ構造を組み合わせ、光子*と電子の量子力学的性質を自在に制御するための研究を進めている。

「現在の情報化社会は光エレクトロニクス（光電子工学）によって支えられて

いますが、量子力学の原理を十分活かしているとは言えません。量子力学的性質を制御し活用することができれば、従来の常識を覆すような新しい技術を創り出すことができるでしょう。その1つの例が量子情報技術です」。

0でもあり1でもある“重ね合わせ状態”とは

私たちがパソコンや携帯、インターネットなどで利用するあらゆる情報は、ご存じのように、“0”か“1”かのビットを最小単位として、その組み合わせ“01101…”で表わされている（図1）。その“0”か“1”かを表現するのが、光や電流の強度（ON / OFF）だ。しかしそれは、光や半導体の性質のほんの一部を使った技術でしかない。そこで、世界中の研究者たちが期待しているのが、量子情報技術だ。量子力学の世界で起こる、“0でもあり1でもある”という摩訶不思議

な現象が、これまで想像もしなかった情報技術を可能にするのだという。

「量子力学の概念を示すのに有名なのが『シュレーディンガーの猫』です（図2）。箱Aの中に猫を入れて、毒ガス発生装置を仕掛けます。一方、箱Bにはランダムに作動するスイッチをセットしておいて、スイッチが入ると箱Aの毒ガス発生装置が起動するようにつなげておきます。一定時間が経過した後では、どちらかの箱を覗いて観測するまで猫が生きている（0）か、死んでいる（1）かわかりません。このような状態を“0でもあり1でもある重ね合わせ状態”といい、これを情報の単位（量子ビット）に用いたのが量子コンピュータです。1つの量子ビットで0と1両方の処理が同時にできるので、たくさんの量子ビットがあると超並列計算が可能になるのです」。

もう1つの重要な概念が「量子もつれ」だ。「スイッチが入る前（B=0）なら猫は生きており（A=0）、入った後（B=1）なら死んでいる（A=1）。つまり『Aが0ならBが0』『Aが1ならBが1』のどちらかですが、観測するまではわかりません。このような状態を“量子もつれ状態”と言います。箱Aと箱Bを空間的に離しておけば、箱Aを観測した

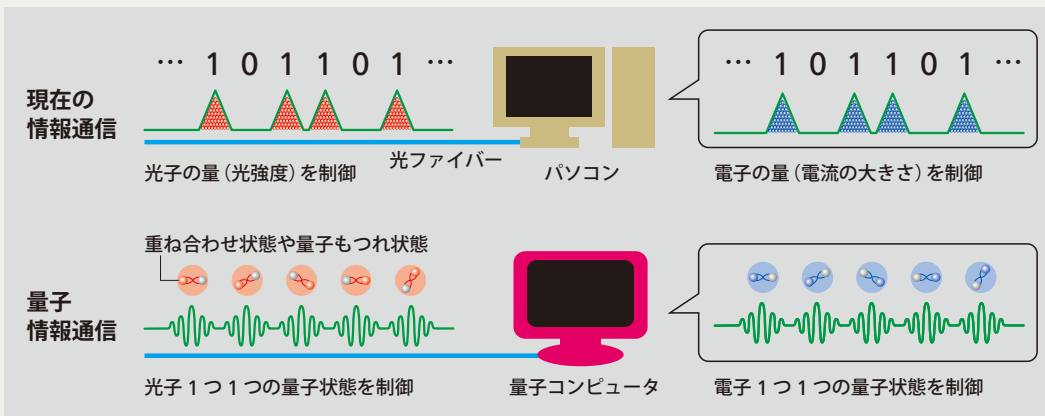


図1 量子を利用した未来の情報技術

現在の情報技術では、光の強さ（光子の量）や電流の大きさ（電子の量）を制御して情報（0か1）を表わしている。これに対し、「重ね合わせ状態」や「量子もつれ状態」と呼ばれる量子状態を活用できれば、量子テレポーションや量子コンピュータ、量子暗号システムなどの革新的な情報技術を実現できる。

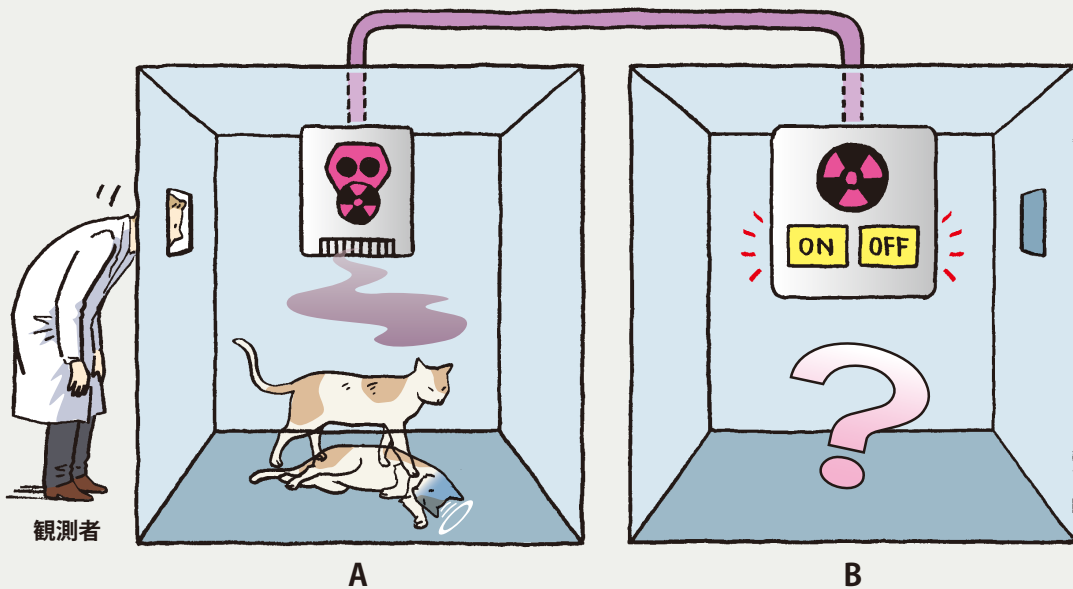


図2 シュレーディンガーの猫

量子力学の不思議な世界を分かりやすく描いたのが、有名な「シュレーディンガーの猫」の絵である。観測者が箱の中を見るまで、猫は生きている(0)か死んでいる(1)か分からない。こうした状態を「重ね合わせ状態」という。また、箱Bのスイッチが入る前(B=0)なら箱Aの猫は生きており(A=0)、スイッチが入った後(B=1)なら猫は死んでいる(A=1)。どちらであるかは箱Aが箱Bの中を見るまで分からない。こうした状態を「量子もつれ状態」という。

瞬間に箱Bの状態が確定し、遠く離れた場所同士で情報を伝えることができる。これが量子テレポーテーションの原理です」。

重ね合わせ状態や量子もつれ状態といった量子状態は、蓋を開けるまではいくつかの可能性が共存しているが、蓋を開け、観測した瞬間に結果が確定してしまう。言い換えれば、量子状態は観測すれば壊れてしまうことを意味する。

「光子が暗号に活用できるのは、光子が最小の粒子で分割できないことに加え、仮に盗聴された(観測された)としても、量子状態が壊れるため、盗聴がわかってしまうからなんですね。また光子を使えば、非常に微弱なエネルギーで情報がやり取りできるため、究極の省エネルギー情報通信が可能となります」。

半導体量子ドットと超短光パルスを組み合わせる

早瀬さんは現在、量子光エレクトロニ

クスの実現に向けて、半導体中の電子と光子の間で量子状態をやり取りしたり、それらの状態を制御したりするための実験を行っている(図3)。しかし、光子のもつ量子力学的な情報を半導体に伝えるには、様々な課題が山積する。

「量子状態は非常に脆くて、アツという間に壊れてしまいます。量子状態を保持しながら、制御したり、移動させたりする必要がありますが、それが非常に難しいのです」。

そこで注目されるのが、量子状態を保持し制御するのに適した半導体、半導体量子ドットだ。これは、最新のナノテクノロジーによってつくられる、 10^{-8} メートルという極微小な半導体の粒。小さな領域に電子を閉じ込めることで、あたかもその領域が1個の原子のような振る舞いをするため、1つ1つの電子の量子状態の制御や保持が容易になるという。

「量子ドットの特長は、サイズや形状によって特性を自由に変えられること。

私の研究グループでは、特殊な手法を用いることで、光ファイバー通信で使われている光と強く相互作用する量子ドットを作製しています。他のグループよりもずっと長く、重ね合わせ状態を保持することにも成功しています」。

とはいえ、量子状態が時々刻々と壊れていくことは避けられない。そこで早瀬さんは、 10^{-13} 秒というとても短く短い時間に瞬間的に光を出すことができる超短パルスレーザーを超高速度なフラッシュとして使うことで、量子状態が壊れる前に制御したり、量子状態が壊れていく様子を観測したりしている。超短パルスレーザーを用いることで、通常の光では起こらない非線形な現象を利用し、重ね合わせ状態や量子もつれ状態を制御することが可能になるという。

もっとも、光子1つに相当する光の強度は極微弱なので、光子と電子の間で狙い通りの効果を引き起こすことは非常に難しい。そこで、量子ドットをたくさん集めることにより、光子と電子の相互作用を高める方法を探っているという。

「量子力学の面白さは、その可能性が計り知れないところ。数十年後の世界を飛躍的に変えるような大発見を目指して研究に取り組んでいます」。

(取材・構成 田井中麻都佳)

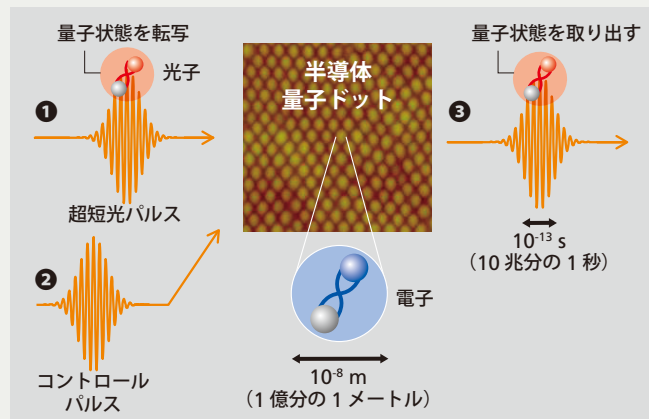


図3 光子と電子の間での量子力学的な情報のやりとり

超短光パルスを半導体量子ドットに照射し、光子のもつ量子力学的な情報(量子状態)を半導体中の電子に転写する①。一定時間後にコントロールパルスを照射し②、電子に転写した量子力学的情報を再び光子として取り出す③。

*光子：光のエネルギーの最小単位。量子力学的にみると、光は波としての性質と粒(光子)としての性質の両方を持っている。