

光る半導体

大阪大学大学院工学研究科 小島一信

1. はじめに

みなさんは半導体が光るということをご存じでしょうか？身近なものでいうと、パソコンやタブレット・スマートフォンなどの画面を照らしているバックライトやLED電球のような室内照明、街で見かけるイルミネーションなどに半導体から放たれる光が使われています。また、インターネットに欠かせない遠く離れた場所とのやりとり(通信)にも光が使われており(赤外線なので目には見えませんが)、その光も半導体によって生み出されたものです。半導体が放つ光の色(波長、エネルギーともいいますが、どれも同量の言い換え)は、半導体の種類によって異なるため、用途に応じて、様々な半導体材料を選んで使います。



図1. 御堂筋線のイルミネーション

2. そもそも半導体とは

半導体という言葉は、英語のsemi conductorの和訳であり、中途半端に(semi)電気を流す材料(conductor)という意味合いです。ですので、電気を流すのが得意な材料(金属)とほとんど電気を流さない材料(ゴムやガラスなど)の中間にある材料という印象を受けるかもしれませんが、この考え方は、間違っているのではありません。私は、半導体の魅力が十分に伝わらないように思っています。

半導体は、純度が高い場合は電気をほとんど流しません。しかし、純度の高い半導体に不純物をつまみ混ぜると、その量に応じて、電気を流す度合いが調整できます。半導体に不純物を混ぜるのは、



図2. 半導体の性能は純度にかかっている、といっても過言ではないので、クリーンに扱う必要がある

半導体を作るときでも、作った後でもできるので、半導体を利用した製品を作る際にもとても便利です。

不純物という言葉は、ちょっとネガティブかもしれませんが。不純物は、半導体に電気を流す力を与える調味料、といったところの業界用語です。ともかく、半導体は加える不純物の量によって電気を流す能力を調整できる点が、金属やガラスといった能力が決まっている材料とは異なります。半導体にはこのような性質に加え、非常に細かく加工することができるという性質もあるため、電子部品や回路をより小型にでき（一つの部品であれば、1mmの千分の一、つまり1 μ m程度かそれ以下の大きにできます）、決められたスペースに、より多くの電子回路を詰め込むことができます（集積回路と呼ばれます）。

ここで、電子という言葉が出てきましたが、電子は電気を運んでいる小さな粒のことを意味します。電子のことを詳しくお話しすると、別の話題になってしまうのでここでは省略しますが、興味のある人は調べてみることをおすすめします。半導体が光る仕組みを知る上でも、電子はとても大切な働きをしています。電子は粒といいましたが、波の性質もあり、量子力学でも主役級のプレイヤーです。

電子の進む（つまり、電気が流れる）道である電子回路のサイズが小さくて、そのおかげで計算をするための機能をたくさん詰め込める（集積の度合いが上がる）と、より計算を速く行える半導体素子を作ることができます。素子というのは、電池やコンセントを使って電気エネルギーを与えてあげると、人間の役に立つ働きをする製品のことで、デバイスと呼ばれることもあります。役に立つ働きというのは、計算や記憶であることが多いのですが、もちろん「光る」ことも含まれます。

3. 光る半導体

半導体というと、よく耳にするお話のほとんどはシリコン（日本語ではケイ素、元素記号だとSi）を指しているように思います。特にシリコンは純度の高いものが作られており、上でもお伝えしたサイズの小さな電子回路をたくさん詰め込んだ半導体素子を作るのに適しているという性質を持ちます。実際、パソコンや家電などの中はもちろん、最近はやりの人工知能（AI）やインターネットのような大量の情報を処理しているのはシリコンでできた半導体素子です。ですので、半導体は計算するもののようなイメージが強いかもしれませんが。しかし、半導体の種類はシリコンに限らずバラエティに富んでおり、ダイヤモンドや塩化ナトリウム（食塩）も半導体の性質を持っています。その中に、少し前に触れた通り、半導体材料の中には光るものがあるのです。

私たちの研究室では、そのような光る半導体を使って、楽しい研究を行っています。ここでは、最近取り組んでいることのいくつかについて、ご紹介したいと思います。

4. 光を使って冷やす

光はエネルギーの一つの形態ですので、ふつう、光が当たって光を吸収した場所の温度は上がります。しかし、ある組成を持つペロブスカイト半導体に特定の光(緑色光)を当てると、その光よりわずかにエネルギーの大きな光を放つことが分かってきました。このわずかなエネルギーの差は、半導体からエネルギーを外へ運び去るものですので、結果として、その半導体の温度は下がります。このように、材料に光を当ててその温度が下がる現象のことを「発光冷却」とか「光学冷却」と呼びます。私たちは、これが新しい冷却の原理になるのではないかと期待しています。

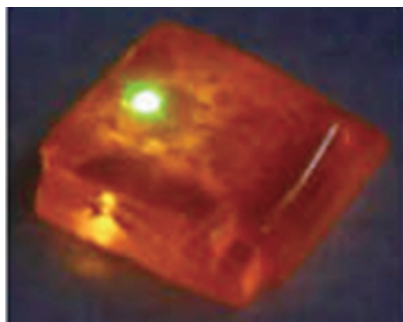


図3. ペロブスカイト半導体の一部が緑色に光っている様子

私たちの日常生活では、冷却といえば冷蔵庫やエアコンが一般的だと思います。これらは、熱いものと冷たいものをくっつける(接触させる)と熱というエネルギーが移動する、という基本的な物理法則の下で動いています。しかし、光を当てると冷える光学冷却では、冷やしたいものに触るのではなく光を当てただけなので、触らない(非接触)という特徴があります。エアコンは非接触のようにも思えますが、空気を物体に接触させて冷やしています。また、光学冷却では、ポンプのような機械を必要としないため、振動も発生しません。これらの特徴を使って、必要な部分だけを狙って冷やしたり、空気がない場所や振動を嫌うような場所を冷やすしたりすることもできる可能性があります。ただし、光学冷却を十分に使いこなすには、まだまだ乗り越えなければならない問題がたくさんあります。ですので、大学の研究室で取り組む研究テーマとして、持ってこいだと思っています。

5. 光を使ってキレイにする

窒化アルミニウムガリウム(AlGaIn)という半導体は、紫外光と呼ばれる光を放ちます。紫外光は目に見える光(可視光)よりエネルギーが大きいという特徴があり、一日中外で遊ぶと日焼けをする原因でもあります。紫外光の中でも、特にエネルギーの大きな光を深紫外光と呼ぶことがあります。このような光は、人間を含めた生物一般が直接浴びると有害ですが、この性質を逆手にとって、細菌やウィルスのような病原体に向けて照射することにより、消毒や浄水といったキレイにする用途に利用することができます(公衆衛生と呼ばれることもあります)。実は、このような深紫外光を使った消毒や浄水は、すでに様々な場面で使われているのですが、深紫外光を作るために、これまでは水銀(Hg)ガスを封じたランプが使われてきました。しかし、水銀の有

毒性や装置のサイズが大型になりがちであるといった性質から、徐々に、AlGaIn LEDに置き換わっていく流れがあります。ここで、LEDという言葉は、light-emitting(光を放つ)diode(ダイオード)を略したものです。LEDは半導体を電気エネルギー(例えば電池)を使って光らせる、一番単純な構造だと言えます。ダイオードについては、高校生の物理の授業で出てきますので、気になる人は調べてみてください。教科書などでは電気を一方通行に流す整流素子として紹介されているかもしれませんが、光る半導体でダイオードを作ればLEDになるのです！

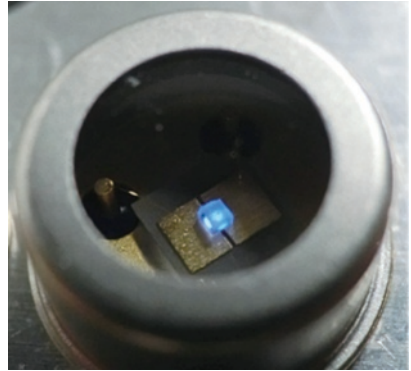


図4. AlGaIn LEDが光っている様子

6. 光を使って無線通信する

スマートフォンなどの、線がどこにもつながっていない(＝無線)、持ち運びに便利な道具が世の中にあふれています。みんながこのような道具をたくさん使うようになった結果、無線通信の渋滞が問題になっています。5G(第5世代移動通信システム)という言葉をごどこかで聞いたことがあるかもしれませんが、研究の世界では、その次の技術(6G)について議論が交わされています。日本国の通信に関するルールを取り仕切っている総務省というところからは、6Gとはこうあるべきという仕様書のようなものが示されており、それには、現在主に使われている電波(マイクロ波、電子レンジにも使われています)だけでは足りないのを、他の波も含めてだれかよい方法を考えてください、といったお願いが書かれています。これを受けて、様々な人が、様々な方式の無線通信の技術をあれこれ考えています。その中には、光を使った無線通信に着目している研究者もいます。私も、その中の一人のつもりです。

光を使った無線通信として、LEDに代表される半導体素子に基づいた、光無線通信技術が注目されています。可視光を中心として、光はマイクロ波などの電波と周波数(1秒間に波がくねくねする回数)が異なるため、混ざってしまう心配がありません。ですので、マイクロ波でできている現在の無線通信ネットワークを邪魔することなく、新しい無線通信の方式として加える(共存させる)ことができるなど、良い点がいくつもあります。しかし、光無線通信で問題となることの一つに、太陽の光が挙げられます。朝や昼に空を見上げても、星を見ることはできませんが、夜は天体観測ができます。これはなぜでしょうか。お気づきの通り、朝や昼には太陽の光があふれており、か弱い星々の光は強い太陽の光に埋もれて見えなくからです。光無線通信でも同じことが考えられ、特に野外では、朝や昼は太陽の光に負けて光無線通信は出来ない可能

性があります。

そこで、私たちが目を付けたのは、先ほどお話した深紫外光です。深紫外光は、オゾン層に吸収される性質を持つため、我々が生活している地球の表面での太陽の光には、ほぼ含まれていないという特徴があります。これはつまり、深紫外光だけで世界を見ると、世界はいつも暗い夜ということが出来ます。このため深紫外光は太陽光の影響を受けない(ソーラーブラインドである)ということができ、朝や昼の屋外でも、安定した光無線通信が期待できます。

このアイデアを確かめるために、深紫外光を使った光無線通信がうまくいっているかどうかを判定するための実験を行いました(情報通信研究機構および東北大学との共同研究)。図の送信機(Tx)が深紫外光を放つAlGaIn LED、受信機(Rx)が光検出器です。光

検出器に直射日光を浴びせながら、真夏の屋外で、朝から晩まで実験を行った結果、きちんとソーラーブラインド、つまり、太陽光があっても、安定した光無線通信を続けることができることを証明することができました。

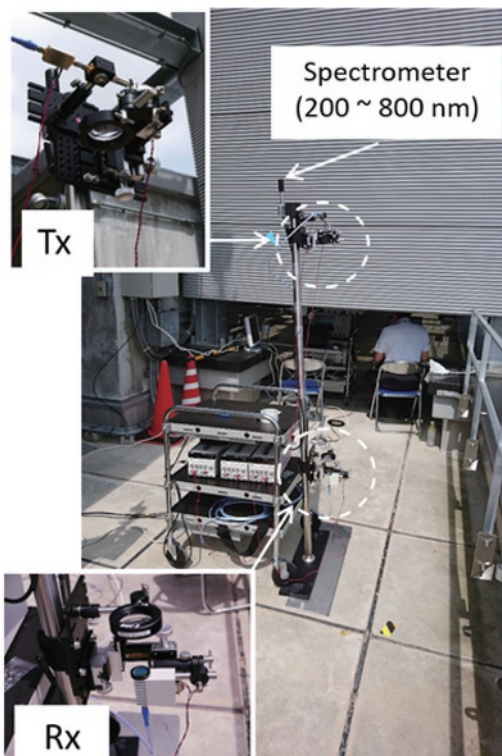


図5. ソーラーブラインド光無線通信を真夏の屋外で行っている様子

8. さいごに

この原稿では、半導体の紹介から始まり、特に光る半導体について、その面白さや魅力について、私が思うところを書きました。また、私たちの研究室にて取り組んでいるいくつかの研究についても紹介しました。光学冷却は、従来の冷却原理をくつがえす可能性を持った挑戦的な研究です。一方、深紫外光をLEDによって発生させる取り組みは、すでに水銀灯で行われている公衆衛生技術のいわばアップグレードを狙った研究といえます。このように、一口に研究といっても、進め方はいろいろあります。また、消毒や浄水のために作られたLEDを使って光無線通信を試みることは、よく言えば、思い込んでいたフレームを取り払い、異分野をつなぐ取り組みといえるかも

しません(悪く言えば、ただの思いつき?)。いずれにせよ、研究には正解のようなものはなく、暗い道、あるいは荒野を、自分の中の不安と闘いながら進んでいくようなものだという人もいます。その時、指針というか、自分を励ましてくれるものがあるとすれば、やはり「楽しい」と思う心ではないかと思います。もしかすると、これは研究に限ったことではないのかもしれませんが。皆さんはどう思われるでしょうか。最後まで読んでいただきまして、ありがとうございました。

ここで紹介した研究は、多くの方の助けを借りて進めてきたものです。この場をお借りして、関係各位に御礼申し上げます。また、この原稿を書く機会を与えてくださった、大阪市立科学館の上羽貴大様に感謝申し上げます。

2002年に大学4年生になって研究室に配属されたとき、初めに先輩に見せてもらった実験が半導体(窒化インジウムガリウム、InGaN)の結晶を光らせるフォトルミネセンス測定というものでした。InGaNの結晶は見た目が透明なのですが、それに紫外光を当てると明るく緑に光る様子を見て、とても感動したことを覚えています。冒頭で述べたLED電球は、このInGaNの放つ光(青色光)を応用した製品です。InGaNはInNとGaNとを混ぜた半導体で、混ぜる比率を変えることで、青・緑・赤など、様々な色で光る面白い材料です。2014年には、InGaNやGaNに関連して日本人がノーベル物理学賞を受賞しています。もちろん当時学生だった私は、InGaNがそんなすごい半導体だとは知らず(後から知りました)、ただきれいに光ったからという理由で研究者人生をスタートすることになりましたが、今でも光る半導体に初めて出会った時の感動は鮮明に覚えています。皆さんは、何に感動したことがありますか？

著者紹介 小島 一信(こじま かずのぶ)



大阪大学大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻教授。京都大学大学院工学研究科、東北大学多元物質科学研究所を経て、2021年より現職。

大阪大学で光る半導体の研究をしています(ご興味のある方は、QRコードから研究室のホームページをご覧くださいけると嬉しいです)。

