

21世紀の光技術をリードする

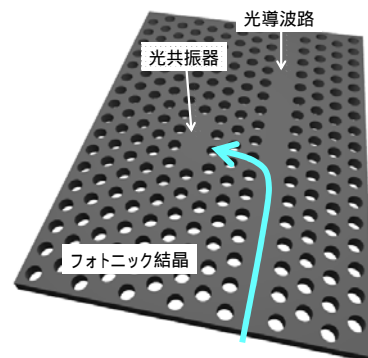
京都大学工学部 電気電子工学科

京都大学工学部電気電子工学科では、電力、制御、回路、情報、通信など、さまざまな分野の研究が行われています。その一つに、「光工学」という分野があります。より専門的に言えば、フォトニクス(photonics)、オプトエレクトロニクス(optoelectronics)、量子エレクトロニクス(quantum electronics)、量子光学(quantum optics)と呼ばれる研究分野であり、具体的には、レーザ光を含め、さまざまな光を発生する材料・素子(デバイス)・装置(システム)の開発、インターネットの爆発的普及に対応するための超高速・大容量光通信技術の開発、微細構造を持つ新規物質中での特異な光の挙動の解明とそれに基づく自在な光の制御の実現を目指した研究などが行われています。このパンフレットでは、当学科における、最先端の研究テーマからいくつかのトピックを選んで紹介したいと思います。

光を止める

光がこの世で最も速いことは、小学生でも知っていると思います。それでは、その光を人が歩く速さくらいに遅くする、さらに、光を止めてしまう、などの話を聞いたら、どう思いますか？物理学の基礎すら分かっていない三流 SF 小説の話と思うかもしれませんが、しかし、最先端の科学によれば、これはあながち荒唐無稽な話ではないのです。電磁波である光がしたがう方程式(マクスウェル方程式)をくわしく見てみると、ある「特殊な状況下」では、光を遅くしたり、止めたりすることが理論的には可能なのです。その特殊な状況を実現する手段のひとつが、ナノメートル(1nmは100万分の1mm)サイズで微細な加工が施された新規物質、「フォトニック結晶(photonic crystal)」です。当学科では、このフォトニック結晶で、世界屈指の研究成果を挙げています。

フォトニック結晶とは、ガラスのような透明な物質(誘電体)に光の波長程度(数百nm)の周期で規則的な加工を施した物質です。材料それ自体は、ありきたりの物質なのですが、そこに光の波長サイズの周期的加工を行うことで、光に対して通常物質とは全く異なる特殊な振る舞いをするようになるのです。図に当学科で作製されたフォトニック結晶の構造例を示します。板状の物体に孔が規則的に配列しています。中央部分に直線状に孔が埋められた部分があり、また、その近傍に部分的に孔が埋められた箇所があります。直線部分は、光の通り道、導波路となります。また、部分的に孔が埋められた部分は、ある特定の波長の光に共振する共振器となっています。いろいろな波長の光を導波路に通してやると、ある特定の波長の光は共振器に共振します。共振という現象は、光が共振器に留まっている、すなわち止まっていると言うことができます。光共振器は昔からいろいろな構造のものがあります。例えば、シャボン玉の膜もある波長の光に対しては共振器となります。しかし、従来の共振器は体積が大きいので、光が止まっているというよりは、むしろ(光の波長から見れば)巨大な共振器の中を往復しているという状態でした。一方、このフォトニック結晶を使った共振器は、極めて微小な領域(光の数波長分)に光を捕まえるため、まさに光がそこに止まっているかのような状態を実現できます。



フォトニック結晶光共振器
導波路を進んだ光のうち、特定の波長の光は、光共振器に捕らえられ、あたかも止まったような状態になる。

フォトリソグラフィを用いたフォトニック結晶の構造を緻密に設計し、かつ、その構造をナノメートルレベルで正確に作り上げることで、極めて高い性能が実現されます。数年前、当学科でコンセプト実証の最初の試作品を発表して以降、さまざまなアイデアに基づく改良を進めた結果、性能は当初の 1,000 倍にも向上し、2 ナノ秒という(光の振動数から考えると大変長い)滞在時間を達成しています。現在、より長時間の滞在を目指した研究、さらには、捕まえた光を外部の信号で解放する研究が進められています。このような光の自在な制御技術は、未来の光コンピュータや超高速・大容量光ファイバー通信を実現するために不可欠な基礎技術として大きな期待を集めています。

超高効率発光ダイオードの開発

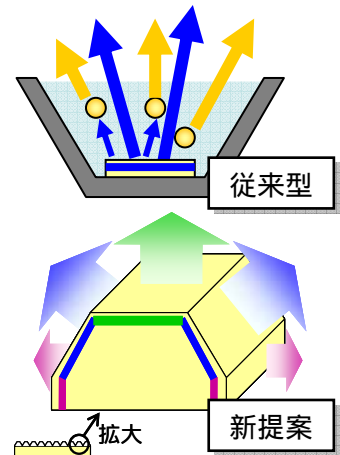
当学科では、小型・高効率の発光デバイスである、「発光ダイオード(LED)」の研究を長年にわたり行っており、これまでに、世界トップレベルの成果を上げています。

LED に関する最近のトピックとしては、白色 LED が実用化され(当学科は発光メカニズム解明で貢献しました)、省エネルギーの切り札として期待されていることがあります。電力を光に変える効率で比較すると、電球 10%、蛍光灯 25%に対して、白色 LED は 50%となります。電球を白色 LED に置き換えれば、消費電力を 1/5 に低減できるのですから、ものすごい技術です。しかし、当学科としては 50%という数字に満足していません。電球に比べれば大幅な改善ですが、まだなお、50%もの電力が熱として無駄に消費されているからです。そこで、物理限界、つまり効率 100%を目指した研究に現在取り組んでいます。

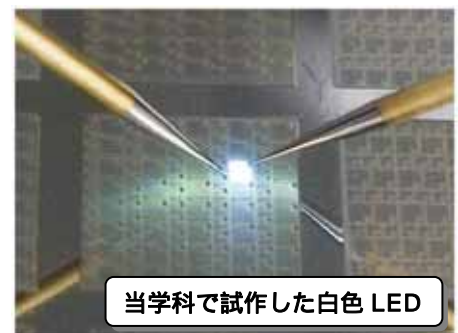
現在の白色 LED は、高効率青色 LED から出た光を蛍光体に照射し、青色光の一部を黄色光に変換し、青色 + 黄色で白色を実現しています。蛍光体で色を変換するときには、原理的にストークス損失という損失が必ず伴うため、現在の方式ではどんなに頑張っても 100%の効率実現は不可能です。そこで、当学科では、他の方式による白色 LED を実現できないかと考えました。

蛍光体を使わないとすれば、現在実用化されている、赤、緑、青の 3 原色の LED を組み合わせるのが一つの手ですが、2 つ問題があります。一つは複数の LED を組み合わせると製造コストが高くなってしまい普及に適さないことです。コストに目をつむったとしても、もう一つの致命的な問題があります。実は、現状の緑色の LED の効率があまり高くないことです。(人間の目は緑に対して一番感度が良いので明るく見えるのですが、実は効率は今ひとつなのです。)

当学科では数年前にこの問題を一挙に解決するアイデアを提案し、そのアイデアの実現に向け、着実に研究を進めています。そのアイデアとは、一言で言えば「ナノかまぼこ」です。発光ダイオードは半導体の結晶でできています。結晶というのは結晶の方位によって性質が大きく異なりますので、色ごとにうまい結晶の方位を選んでやれば、高効率化の実現が期待できます。これにより緑色の効率アップが実現できます。さらに、複数の色を一度に作るべく、半導体の結晶を微細なかまぼこ形状に加工することにしました。かまぼこの表面(上面、側面)に発光の役割を担うナノメートル厚さの層(半導体量子井戸)を形成すれば、それぞれの部分がいろいろな色を高効率に発生するので、全体として極めて効率の良い白色 LED になるというアイデアです。どのような方位の結晶がどのような波長の光を高効率に発するかという、半導体光物性の研究、それを統一的に説明する理論の構築、いろいろな結晶方位に LED の元となる半

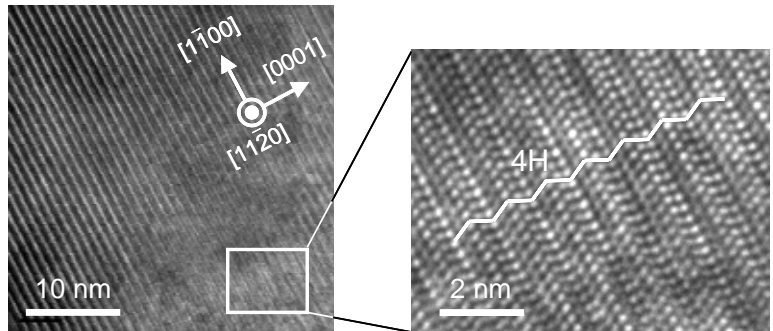


白色 LED の構造
 現在の白色 LED は青色 LED から出た光を蛍光体で黄色に変換している。当学科の白色 LED は微細な構造の上面や側面からさまざまな色の光が発せられ白色となる。



導体結晶層を形成する微細加工技術と結晶成長技術、全体としてきれいな白色光にするための、かまぼこ形状の設計技術など、総合的な研究が進められています。まだ試作品の段階ですが、写真のように「ナノかまぼこ LED」が試作され、きれいな白色光を放っています。

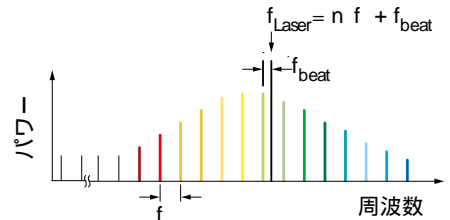
また、当学科では、白色 LED のさらに先として、「深紫外線」を出す LED の実現にも取り組んでいます。深紫外線は、殺菌、有害物質の分解、医療や化学分析装置の光源など幅広い応用がありますが、現在は、水銀ランプやガスレーザーなど大型の光源が使われています。これを小型・軽量の LED にすることができれば、装置の小型・軽量化につながり、装置の普及や低コスト化など大きな波及効果があります。当学科では複数の研究室が、深紫外線を効率的に発生する新しい半導体材料の探索や、その材料を高品質に作るための結晶成長技術の研究をしています。その一例を紹介すると、窒化アルミニウム (AlN) という半導体の研究があります。この材料の性質が深紫外発光に適していることは広く認識され、世界中の研究機関が研究に取り組んでいるのですが、なかなか良い結晶ができません。当学科では、作り方を工夫して、自然界には通常存在しない特別な結晶構造とすることで、極めて高品質の AlN を作製できることを提案・実証しました。電気電子工学科では、このように、物質科学、結晶科学など物理と化学の中間に位置する研究も行っているのです。



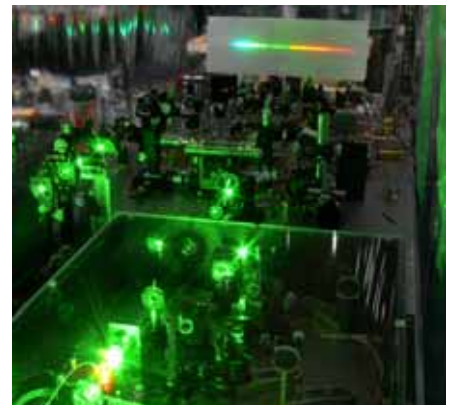
深紫外 LED に有望な窒化アルミニウムの透過電子顕微鏡写真
 当学科で作製した窒化アルミニウムは自然界に存在しない結晶構造(原子配列)を持ち、かつ、極めて高品質であることが確認された。高性能深紫外 LED 用材料としての応用が期待されている。

光による時間のものさし

昔からの時間(その逆数である周波数)の基準は、地球の自転でした。しかし、技術の進歩と共に時間測定のパラメータが上がる、実は地球の自転はゆらゆらと変動しており、当てにならないことが判明しました。(しかも地球の自転速度は徐々に遅くなっているのです。)そこで現在では、セシウム(Cs^{133})原子が吸収する電波(マイクロ波)の周波数を時間の基準とすることが国際標準として定められています。これを原子時計と呼びます。極めて精密に調整された原子時計は 15 桁もの精度を持っています。これは、3000 万年で 1 秒しか狂わないという想像を絶する精度です。



ところで、科学技術のさまざまな場面で、光の周波数を正確に測ることが求められます。例えば、超精密機械加工においては、光の干渉を使って距離を計測するのですが、使っている光の周波数が正確に分らなければ、波長が分からず、加工精度を保証できません。正確な周波数測定のためには、上記の原子時計と比較して測る必要があるのですが、光の周波数と原子時計の周波数は大きく異なるため、比較が困難です。そこで開発されたのが、「光による時間のものさし」です。このものさしは、原子時計を基準に、周波数が正確に一定間隔 f となっている周波数の異なる光の集合です。周波数スペクトルで見ると、光のピークが一定間隔で櫛(コム, Comb)状になっていることから、周波数コムと呼ばれています。この周波数コムを用いれば、光の周波数測定を容易に行うことができます。具体的には、まず、測定したい光の周波数に一番近い n 番目の周波数の



周波数コムの概念図と発生装置
 周波数が正確に等間隔で並んだ光の集合であり、一つ一つの光を周波数測定「メモリ」として利用できる。発生装置は精密に調整された複雑な光学システムからなる。

光を周波数コムの中から選びます。その光と測定したい光を合わせると、両者の周波数の差で、光の強弱、つまり「うなり」が発生します。このうなりの周波数 f_{beat} を測定すれば、求める光の周波数は、 $n f + f_{\text{beat}}$ と求めることができます。周波数コムの一つ一つの光が、ものさしの「メモリ」に対応するわけです。

当学科では、この周波数コム発生装置の研究開発を進めています。写真を見れば分かります。膨大なミラーやレンズ、回折格子や光学結晶、制御装置が組み合わさった複雑な装置です。周波数コム発生装置から出てきた光を分光すると、きれいな虹色になっています。しかし、この虹は、雨上がりの虹とは異なります。普通の虹は、連続的にさまざまな光が混ざったものですが、周波数コムの虹は、スペクトルの鋭い光が正確に等間隔にならんだ、現代科学の粋を集めた虹なのです。周波数コムの周波数間隔を極めて高精度で原子時計に一致させる技術開発を進めると共に、この装置を小型化し、広く使えることのできる装置にするための研究が行われています。

未来のインターネットを支える光ファイバー通信

光ファイバー網は日本全国のみならず全世界に張り巡らされています。この光ファイバー網による高速通信がインターネットの根幹を支えているのはみなさんご承知の通りです。しかし、インターネットが爆発的に普及し、また、利用形態も、メールなどの文字情報から動画へと高度化しているため、その根幹となる光ファイバー網に対して、通信容量のさらなる向上が求められています。

光ファイバー通信の基本は、光の点滅で情報を送ることです。点灯がデジタル信号の1、消灯が0に対応し、点滅の列で情報を送ります。点滅を早くすれば、より多くの情報を送ることができますが、光のパルスが長距離のファイバーを伝わる間にぼやけてしまう現象(分散)のために、毎秒100億パルスが限界となります。そこで、さらなる通信容量向上のため用いられているのが、波長(色)の異なる光を用いて、1本の光ファイバーで並列に情報を伝えるという方法です。ファイバーの出口に、プリズムのような波長ごとに光を分ける装置を置いて、それぞれの波長の光の点滅を受信すれば良いのです。100種類の波長を使えば、100倍の情報を伝えることができます。いくらでも波長を変えれば、いくらでも通信容量を増やせると思うかもしれませんが、そうは行きません。光ファイバーには吸収や分散や非線形性などさまざまな物理現象があり、波長によっては光が減衰して遠くまで届きませんし、吸収のない波長であっても、非常に高速のパルスで、かつ、複数の波長の光が同時にファイバーを伝わると様々な現象が生じ、その結果、通信エラーが急増してしまいます。当学科では、光ファイバー中での光の物理を理解した上で、いろいろな工夫を凝らした、新しい通信方式の開発などを行っています。

光工学分野以外でも、光は分析や計測などに使われています。例えば、電離気体であるプラズマ中で原子や分子がどのような状態にあるかをプラズマの発光を分析することで解明する研究、光を使って頭の外側から脳の活動をセンシングする研究、強力なレーザー光を空に向けて発射し大気中の粒子による散乱光を検出して、地球の大気圏の様子を調べる研究などが当学科で行われています。

電気電子工学科は、100年以上の伝統ある研究分野から、光工学のような新しい研究分野まで幅広く対象としています。壮大な体系が構築された分野で、さらにその先に行く研究をしても良いですし、まだまだ定説が確立されていない未開の分野で、野心的なテーマに取り組むのも良いでしょう。いずれにしても、熱意と柔軟な発想を持った若い皆さんの参加を待っています。

詳しくは...

京都大学工学部電気電子工学科
<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp>

執筆： 京都大学工学部電気電子工学科
電子物性工学講座半導体物性工学分野
(企画・広報委員会 広報担当) 准教授 須田 淳
写真提供： 電気電子工学科関係教員