



INTERVIEW

Koide Yasuo

中核機能部門
小出康夫部門長インタビュー

TEXT: 池田亜希子

逆境から輝いた青い光

NIMSの小出康夫は、現在、ワイドギャップ半導体研究の最先端を走っている。ワイドギャップ半導体とは、その性質からパワー・デバイスの省エネルギー化や発光デバイスの短波長化が期待されており、身近な実用化例としては青色発光ダイオード(青色LED)があげられる。小出は学生時代、青色LEDの歴史的な開発を間近に見ていた。

「MOVPE 1号機」の立ち上げ

Q: 青色LEDを開発した赤崎勇先生の研究室にいたことがあるそうですね。

小出: 1984年に、私は名古屋大学の赤崎研究室に博士1年生として入りました(写真1)。天野先生は1つ後輩の修士2年生で在籍していました。その時、赤崎先生から与えられた課題は、まず、MOVPE(有機金属気相エピタキシャル成長法)のための装置をつくることでした。MOVPEとは、基板となる物質に、水素や窒素などと有機金属化合物が混ざったガスを吹き付け、基板上に化合物半導体の単結晶薄膜を成長させる方法です。私は、豊橋技術科学大学での修士課程の間にMOVPEの装置を組み立てた経験がありました。当時、MOVPE装置は製品化されていなかったため、「窒化ガリウム(GaN)の結晶成長を成功させるために、あ

なたの経験を元に装置をつくってくれないか」と言われたのです。

Q: 窒化ガリウムとは、正に今回ノーベル物理学賞を受賞した青色LEDの材料ですね。

小出: 当時、天野先生が窒化ガリウムで未開発の青色LEDをつくろうとしていました。LEDはn型半導体の電子とp型半導体の正



写真1: 1985年8月赤崎研夏旅行にて

孔が再結合するときに発光します。そのため窒化ガリウムのn型とp型の良質な単結晶が必要でした。それで、天野先生とともに装置をつくることになったのです。

私は、家を建てる時の棟梁みたいな立場でした。図面を引いて、必要な部品をリストアップして。資金はなかったので、中古の部品や装置を使ったり、赤崎先生が長年勤めていた松下電気産業の方に部品をつくってもらったりしました。

こうして3カ月ほどで組み立てたのが、MOVPE1号機でした。今では、名古屋大学の赤崎記念研究館のモニュメントになっています(写真2)。

交代で行った「孤独な実験」

Q: このMOVPE1号機が、大きな成果を上げたのでしたね。

小出：この装置を使って、天野先生は窒化ガリウム、私は窒化ガリウムにアルミニウムを加えた新材料の結晶成長に取り組みました。私の新材料は、後にLEDに使われるようになりますが、当時は何もわからなくてまず物性を調べることから始めました。この1台の装置を2週間交代で使ったので、2人とも本当に時間が惜しかったですね。天野先生は1回2〜3時間かかる結晶成長実験を2年間に1500回以上おこなったと言っていますよ。

Q：具体的には何をしていたのですか？

小出：2人とも、それぞれの材料をサファイアの基板の上で結晶成長させようとしていました。ところが、基板のサファイアとその上で結晶化させようとしている材料の格子定数、つまり原子と原子の間隔が違い過ぎたため、なかなか高品質な結晶を得ることはできませんでした。ある時、天野先生がこれを解決する方法として、サファイアと材料の間に「座布団」を引けばいいことに気づいたんです。

Q：「座布団」とは？

小出：私がそう呼んでいるだけで(笑)、正式には緩衝層といいます。基板の上に、基板と材料の間くらいの格子定数をもつ緩衝層をつくってから、その上に目的の材料を結晶化させるんです。具体的には、窒化アルミニウムで緩衝層をつくりました。天野先生に言われて、私の材料でも試してみたのですが、高品質な結晶ができたことは一見してわかりました。表面がデコボコしていると結晶は白濁しますが、高品質の結晶の表面は鏡のようにきれいでしたから。物性を調べると、結晶学的にも電氣的にも光学的にも世界最高の品質だということがわかりました。結晶学的には、単結晶薄膜としての配向性、鏡面性に優れること、電氣的には、残留電子濃度が低く、電子移動度が高いこと、光学的には、バンド端近傍の発光（励起子発光といいます）が極めて強いことです。これを「結晶学的・電氣的・光学的に世界最高の品質」と表現しています。これが、青色LED開発の最初のブレイクスルーであり、MOVPE1号機の大きな成果でした。赤崎先生も天野先生も、高品質な窒化ガリウムの結晶成長の成功が一番重要だったと言っています。

赤崎先生の信念

Q：赤崎先生はどのような先生でしたか。

小出：研究室を主催するという立場で、細かいことは何も言わない先生でした。私達を信じて、いろいろなアイデアを自由に試させてくれました。しかし、研究の大きな方向性は赤崎先生が決めていました。窒化ガリウムは、一時、青色LEDになり得る材料として脚光を浴びました。ところが結晶化が難しかったために、多くの研究者は当時青色発光が報告され始めていたセレン化亜鉛（ZnSe）に流れていきました。それでも、私たちが窒化ガリウムにこだわったのは、赤崎先生の強い信念であつたと思います。赤崎先生は、窒化ガリウムを諦めなかった理由を、窒化ガリウムのような硬い物質は、セレン化亜鉛のような軟らかい物質に比べて結晶をつくりにくいのですが、できた結晶はとても強いという特徴があるからだと言っています。実際、セレン化亜鉛では青色発光してもすぐに結晶の欠陥が増え、壊れてしまいます。この結晶の強さがエネルギーの大きい青色の光を発する為には必要な性質でした。

真のイノベーション

Q：結晶化の成功で、窒化ガリウムは改めて脚光を浴びたのでしょうか。

小出：それが違いました。1985年に結晶化に成功した時には、研究室をあげてイノベーションだと喜んで、国際学会で積極的に発表しました。ところが、途中で退出してしまう人もいる有様でした。それで、実際に青色LEDをつくらなくてはダメだということになったんです。天野先生は青色LEDを実現するためにも、まずは未開発のp型半導体をつくろうと、窒化ガリウムにII族の元素をいろいろドーピングしました。そして、1989年、窒化ガリウムにマグネシウムをドーピングして電子線を照射する方法を発見したのです。

Q：それが今の、青色LEDの大きな市場へとつながっていくのですね。

小出：この時点では世の中は、青色LEDの実用化は21世紀になると思っていました。それが、1993年に突然、当時、中村修二先

生が勤めていた日亜化学工業が量産すると発表したのです。青色LEDができたので、黄色の蛍光体を組み合わせて、白色がつけられるようになりました。これは、蛍光灯の蛍光体をつくっていた日亜化学工業ならではのアイデアだったと思います。こうして白色LED照明が現実のものになり、今では2兆円もの市場を生み出しています。これが本当のイノベーションです。

ここに至るには、3人目の受賞者、中村先生の功績も大きかったです。1つには、窒化ガリウムのp型化はマグネシウムを加え加熱すればよく、電子線を照射する以外の方法を発見したことでした。これは、量産化と低コスト化を容易にしました。加えて、窒化ガリウムにインジウムを混ぜて(InGa_N)、青色LEDの発光層にしたことでした(図1)。結晶には、インジウムの濃度が高い場所ができます。この部分は、周りよりエネルギー的に低



写真2：名古屋大学 赤崎記念研究館に展示されているMOVPE1号機

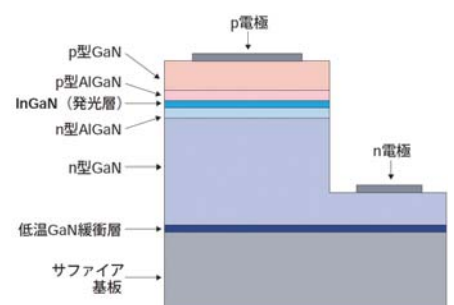


図1：青色LEDの構造

いという特徴と、正孔と電子を引き付けそこで再結合を起させて発光させる性質がありました。これによって改善されたのは、窒化ガリウムの放つ光よりも少しエネルギーが小さくなり、真の青色になったこと。さらに、正孔と電子が結晶中の欠陥部分に落ち込まなくなったため、そこから結晶が壊れる問題が起こらなくなったことでした。この2つの成果が加わり、青色LEDは実用化されました。

ですから、3人の功績がこうして認められたことは本当に良かったと思っています。

もちろん、すべての始まりはMOVPE 1号機での窒化ガリウム結晶の高品質化の成功ですけれどね。



物質・材料研究機構
中核機能部門 部門長
小出康夫

進化するワイドギャップ半導体

ワイドギャップとは

ワイドギャップ半導体とは、その名の通り“広いバンドギャップ”をもつ半導体のことである。半導体材料として最も一般的なシリコン(Si)のバンドギャップエネルギーが約1.1 eV^{*1}であることから、その倍の値の2.2 eV以上の場合、バンドギャップが広いと言う。

ワイドギャップ半導体には、極めて強い結晶結合力を有するものがあり、そのため物理的・化学的に非常に安定で、高

温、高電流など厳しい環境にも十分に耐えることができる。この性質を利用し、高効率(省エネ)で長寿命の発光デバイスや電子デバイスが作られている。

ダイヤモンド半導体

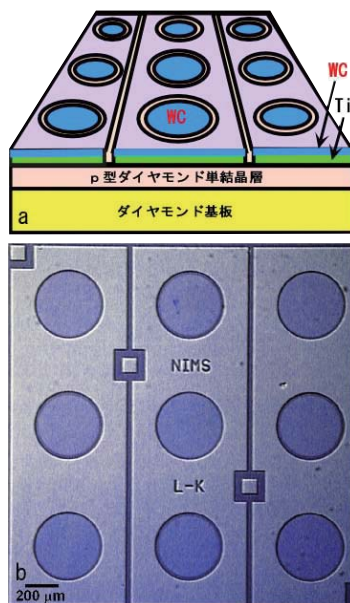
「数あるワイドギャップ半導体材料の中で、ダイヤモンドは特にチャレンジングです」と話す小出。ワイドギャップ半導体の代表とされる窒化ガリウム(GaN)や炭化ケイ素(SiC)で世界的に研究が進む中で、NIMSは、新材料としてダイヤモンドに取り組んでいる。ダイヤモンドは5.5 eVという極めて広いバンドギャップをもつ。これは、光でいえば深紫外線(波長190～280nm)に相当する非常に大きなエネルギーだ。

ダイヤモンドはSiCの12倍の熱伝導性を有し、絶縁耐圧も非常に高く、化学的な安定性もあるので、これらの特性を背景に光デバイスや電子デバイスとしての利

用が期待されている。そのためには、当然p型、n型の半導体が必要だが、ドーピングによって発生した結晶欠損を熱処理で回復させることが難しく(炭素系材料の最安定相がダイヤモンドではなくグラファイトであり、熱処理してもダイヤモンドに戻らないため)、特にn型の形成が困難だった。しかし、現在ではマイクロ波プラズマ化学気相合成法でのリンのドーピングなどによりn型ダイヤモンド半導体も開発されている。

深紫外線センサの開発に成功

目に見えない光、深紫外線(波長190～260nm)。これを太陽光が存在する真昼や戸外においても検知できれば、炎や有害物質のみを高感度・迅速に検知することができる。小出はこの小型「太陽光ブラインド紫外線センサ」^{*2}の開発において、高品質なダイヤモンド半導体を使用している(図)。機械的強度が強く、最も熱伝導性が高く、最も熱的・化学的に安定しているダイヤモンド半導体の長所を生かした。今後も小出は、ダイヤモンドを使ったセンサや電子デバイスの開発を進める。



図：小出が開発したショットキーダイオード型ダイヤモンド深紫外線センサ模式図および表面写真(左)とパッケージ素子の写真(右)



*1: 1 eVとは電子1つを電圧1 Vで加速した際に得られるエネルギーに相当。

*2: 太陽光線に影響されことなく波長280nm以下の紫外線をセンシングできる光センサを太陽光ブラインド紫外線センサと呼んでいる。