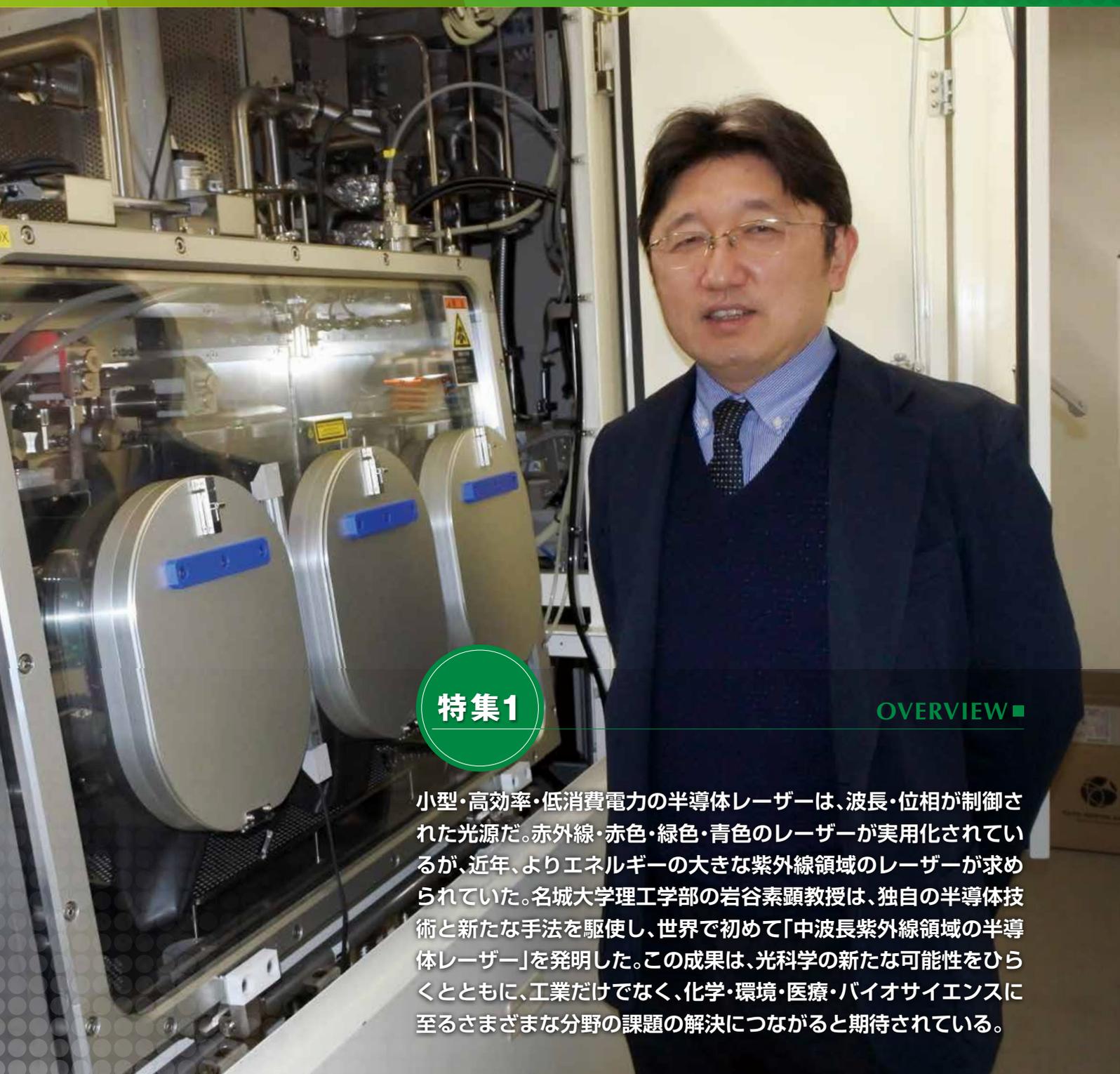


光科学に新たな可能性をひらく 中波長の紫外線半導体レーザー

岩谷 素顕 Iwaya Motoaki

名城大学 理工学部 教授
2016年よりCREST研究代表者



特集1

OVERVIEW ■

小型・高効率・低消費電力の半導体レーザーは、波長・位相が制御された光源だ。赤外線・赤色・緑色・青色のレーザーが実用化されているが、近年、よりエネルギーの大きな紫外線領域のレーザーが求められていた。名城大学理工学部の岩谷素顕教授は、独自の半導体技術と新たな手法を駆使し、世界で初めて「中波長紫外線領域の半導体レーザー」を発明した。この成果は、光科学の新たな可能性をひらくとともに、工業だけでなく、化学・環境・医療・バイオサイエンスに至るさまざまな分野の課題の解決につながると期待されている。

50年代から始まった研究 残された未踏領域に挑む

波長や位相がそろい、指向性と収束性に優れた「レーザー光」は、光ディスクやレーザープリンター、光通信などのさまざまな分野の製品に使われており、生活に欠かせない存在となっている。なかでも半導体レーザーは、ガスレーザーや固体レーザーに比べ、小型・高効率・長寿命・高生産性などの優れた特性を持つことから、広く活用されてきた。

半導体レーザーは「活性層」と呼ばれる層を、負の電荷を持つ自由電子が多数キャリアであるn型半導体と正の電荷を持つ自由正孔が多数キャリアであるp型半導体で挟んだ構造をしている(図1)。また、このような構造にすることで光を閉じ込め、光の定常波を作る光共振器の役割を持つように設計されている。これに電圧を印加すると、高いエネルギーを持つn型半導体中の自由電子とp型半導体中の自由正孔が活性層に注入され、再結合する。

再結合により生じたエネルギー、すなわちこの場合には、材料のバンドギャップエネルギーに相当するエネルギーが光電変換され、レーザー光として発振される。バンドギャップエネルギーとは電子状態が存在しないエネルギー範囲で、半導体材料によって決まる。このギャップが大きければ発振する光のエネルギーも大きくなる。1950年代にアイデアが提唱されると、60年代から本格的な開発が始まった。まず光のエネルギーが小さく波長の長い赤外

領域、そして赤色→緑色→青色と光のエネルギーが大きく波長の短い領域へと拡大していった(図2)。その後、さらにエネルギーの大きい紫外線領域の半導体レーザーが望まれるようになった。しかし、これを実現するためには、3電子ボルト(eV)を超える大きなエネルギーギャップを持つ高品質な半導体材料を作り、かつ光学利得が発生するような大電流を注入してレーザーを発振させる必要がある。

世界中の研究者が開発を競い、波長320~380ナノ(ナノは10億分の1)メートル(nm)の長波長紫外領域の半導体レーザーは2003年に、280nm以下の短波長紫外領域は19年に発明された。そして最後の未踏領域となったのが、日焼けの原因としてもよく知られる280~320nmの中波長領域の紫外線UV-Bの半導体レーザーだった。この難題に挑んだのは、CREST「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクス」の基盤技術研究領域で「深紫外領域半導体レーザーの実現と超高濃度不純物・分極半導体

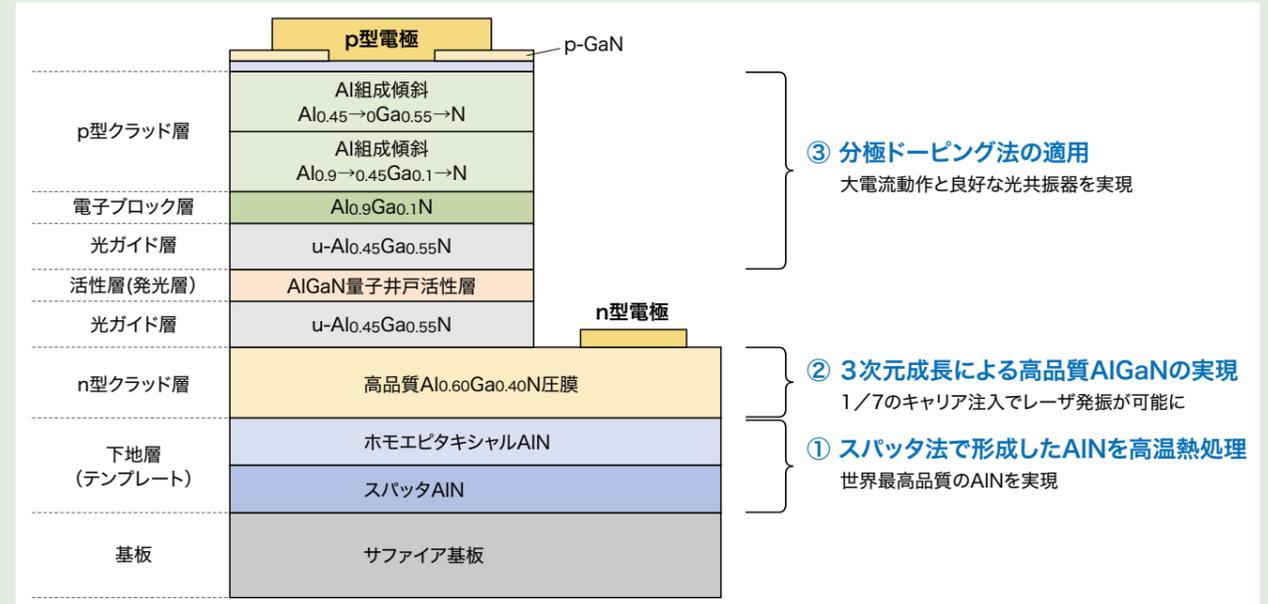
の研究」を率いる、名城大学工学部の岩谷素顕教授だ。

重なる失敗に揺らく決意 赤崎博士の言葉で再挑戦

岩谷さんは「高輝度かつ低消費電力の白色光源を可能にした高効率の青色LEDの発明」で14年にノーベル物理学賞を受賞した赤崎勇博士(21年没)の教え子の一人として、大学の学部生時代から20年以上にわたり指導を受けてきた。技術や研究に対する考え方、研究者としての心構え、発想やアプローチの仕方、視点の取り方など、さまざまなことを教わったと語る。「論文には全て目を通し、1つ1つの確かな助言や提案をいただきました。赤崎先生にお会いしなければ、私の研究人生はなかったと言っても過言ではありません」。

そもそも電子物性工学の世界では、中波長紫外線半導体レーザーの開発は不可能だろうと考えられていた。というのも、半導体レーザーはバンドキャップエネルギーが3.8

図3 半導体レーザーの断面図と各層に用いられた3つのブレイクスルー技術



~4.4eVの半導体材料が必要だが、3eVを超える材料は高い絶縁性を持っている。つまり、電気を通さない材料にレーザー発振に欠かせない大電流を流すという、両立できない困難な課題を解決しなければならないのだ。また、安定した利用に耐えうる半導体レーザーを作るためには、結晶欠陥が少ない高品質結晶を持つ新材料の開発が不可欠だ。

この不可能という常識に囚われ、ほとんどの研究者は中波長紫外線半導体レーザーの研究に取り組んでいなかったという。しかし「どうせやるならば、誰もできないような困難な課題に取り組みたい」と、岩谷さんは果敢にもチャレンジを決めた。ところが、さまざまな手法を駆使し、いくつもの材料開発に取り組んだものの、ことごとく高い壁にはね返され続け、次第にその決意は揺らいでいった。

そして研究開始から数年後、とうとう研究を断念しようと、その旨を赤崎博士に伝えた。すると普通の温厚な様子から一変し、猛烈に怒られたと岩谷さんは振り返る。「君の決意はそんなものだったのか。多くの学生を巻き込んで、その責任は取れるのか。そんなことで諦めるなら研究

者をやめてしまえ」。その日から、再び岩谷さんの挑戦が始まった。

世界最高品質のAlNを実現 3次元成長でAlGaIn層作製

さまざまな分野にアンテナを広げ、考えつくあらゆる仮説を立て、いろいろな手法や材料開発を試みた。試作したサンプルは数百点に及んだ。その後も試行錯誤を繰り返し、ようやく手ごたえを感じ始めたのは、再スタートを切ってから4年後の14年頃のことだった。そして16年、CRESTに採択された頃から、いくつかのアイデアが具体的な形になってきた。「スパッタ法で形成した窒化アルミニウム(AIN)の高温熱処理」「3次元成長による高品質窒化アルミニウムガリウム(AlGaIn)の作製」「分極ドーピング法」という3つの手法である(図3)。

n型クラッド層では、高品質なAlGaIn結晶を生成するために、当初2次元的な結晶成長法を採用していた。しかし、成長途中でクラックとよばれる結晶の裂け目や転位と呼ばれる格子欠陥が多数できてしまい、レーザー発振に耐えうる高品質な結晶を得ることができなかった。一般

にクラックや転位があると発光効率は低下するため、光励起レーザーの閾値も1平方センチメートルあたり210キロワット(kW/cm²)と期待する値に達しなかった。

従来、基板とその上に成長する結晶は、軸の長さや角度といった格子定数を一致させる必要がある。1パーセントを超える格子不整合を持つと、高品質な結晶は得られないとされている。青色LED開発の際に、赤崎博士も同じ課題に直面したが、これを打ち破るために開発したのが、低温堆積緩衝層技術だ。サファイア基板の上にAlNを堆積させた後、窒化ガリウム(GaN)結晶を成長させる手法だ。これにより、結晶欠陥が少ない、平坦なGaN結晶を得て、青色LEDの発明へとつながった。

AlGaIn系材料の研究では3次元成長法を使うことは珍しかったが、ノウハウを熟知していた岩谷さんは赤崎博士の手法を踏襲し、結晶作成に取り掛かった。共同研究者で三重大学大学院地域イノベーション学研究所の三宅秀人教授が開発し、近年紫外LEDのAlNテンプレートの作製方法としても広く使われつつある、高品質AlN生成技術を活用したという。

図1 半導体レーザーの仕組み(左)と電子のエネルギー状態(右)

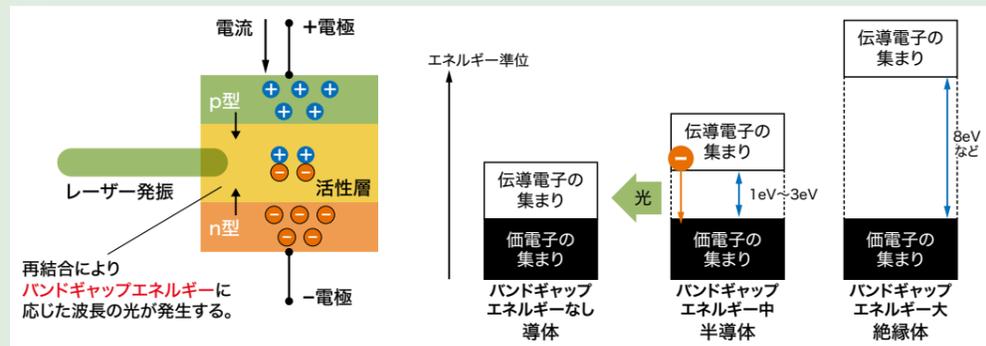
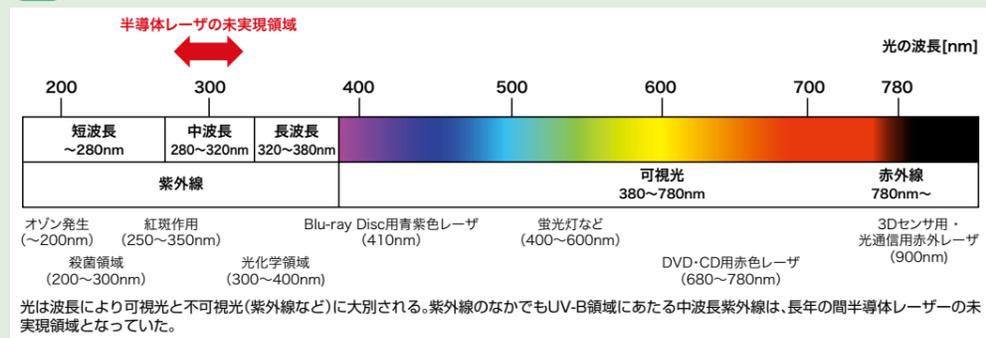
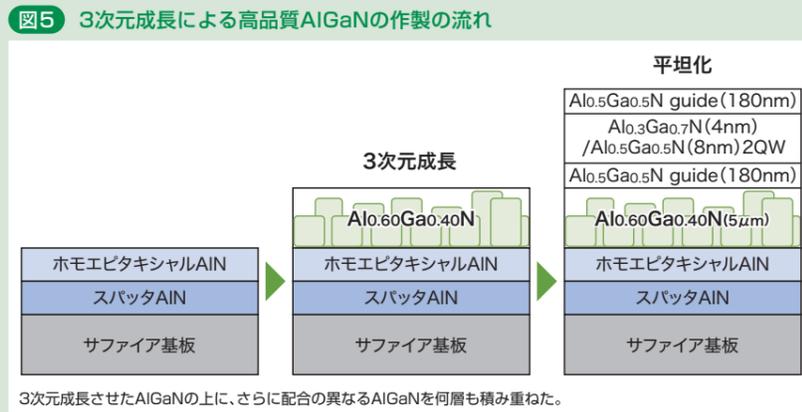
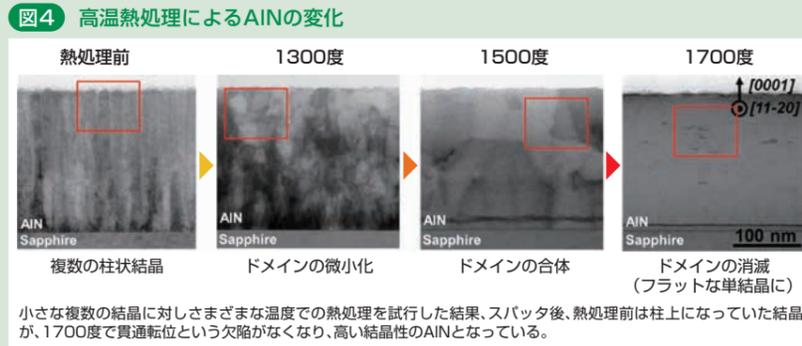


図2 光の種類と半導体レーザーの未実現領域



窒素などのイオンが原料となるAINに衝突し、たたき出された分子を基板に付着させるスパッタ法でAINの薄膜をサファイア基板の上に堆積させた。作製された結晶は微結晶な状態で積層されるが、1700度の高温で熱処理することにより結晶欠陥が非常に少ない、高い結晶性のAIN膜を得ることに成功した(図4)。

このAINをテンプレートとして、その上にAlGaInを3次元成長させた(図5)。AINとAlGaInの間にも1パーセント以上の大きな格子不整合があったため、一筋縄ではいかずさまざまな条件を試みた。「開発に3年ほどかかりましたが、学生さんが本当によく頑張ってくれたおかげで、光励起レーザーの閾値パワー密度は2次元成長の場合のおおよそ7分の1に相当する36kW/cm²まで低減しました」と笑顔を見せる。現在はさらに半程度まで低減する方法を確立した。

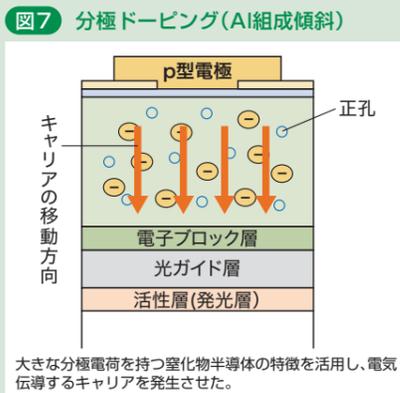
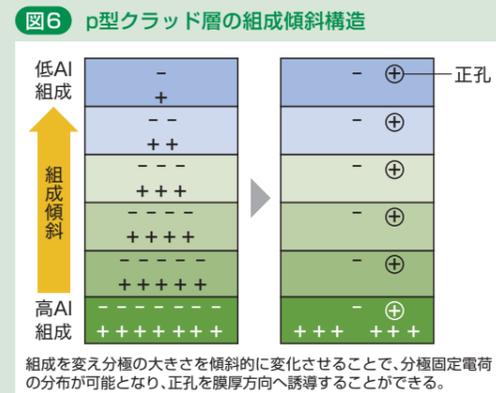


絶縁体工学の手法を導入 分極ドーピングで発振成功

苦勞して完成した結晶でも、レーザー発振しなければ元も子もないが、大きなバンドギャップエネルギーを持つ結晶に、大電流を注入することは簡単ではない。さらに、半導体レーザーでは光を制御するために光の波長以上の膜厚が必要で、従来の半導体工学で多用されている不純物添加による伝導性制御では、レーザー発振に必要な大電流密度動作が実現で

きない。そこで岩谷さんが目を付けたのが、分極ドーピングだ。一般的に半導体結晶は電気的には中性だが、窒化物半導体は対称性が低いために、大きな分極電荷を持っている。分極ドーピングは、この分極電荷を活用することによって電気伝導するキャリアを発生させる方法だ(図6)。分極は絶縁体材料で用いられる概念だが、この分極効果を用いると自由電子や自由正孔を発生させることができ、青色LEDの特性改善に成功したと、米国ノートルダム大学の

グループが発表していた。今回の研究ではp型クラッド層に分極ドーピング法を適用し、AlGaIn材料の組成を変えて分極の大きさを傾斜的に変化させた(図7)。これによって分極固定電荷を分布させることができるようになり、19年にレーザー発振が可能なレベルの電流注入と光共振器の形成を同時に実現した。半導体工学にはなかった新しい手法で、これまで実現不可能といわれてきた「電気を通すことのできない材料に電流を流す」という難題を克服できたのである。



これら3つの手法で作った試作デバイスを室温で評価したところ、半導体レーザー特有の発光パターンやスペクトルが得られていることが確認できた(図8,9)。その結果を受けて、20年2月に世界初の中波長紫外線領域の半導体レーザーを発明したと発表した。論文発表に至るまでも、



何度も査読委員とやり取りしたと岩谷さんは振り返る。「世界初ですから、本当にできたのかと聞きたくなるのは当然でしょう。たくさんの証拠資料を提出し、ようやく認めてもらったときはうれしかったですね」。この発明は発表されるや、国内外で大きな反響を呼んだ。革新的な半導体素子の開発は、結晶成長学のみならず、半導体工学の発展において極めて重要な成果として絶賛され、学会や新聞各紙を賑わした。まさに、光科学と半導体工学の未来を照らしたのである。

大きさ、消費電力は100分の1 DNA塩基配列解析や皮膚治療に

今回開発した半導体レーザーの応

用分野は広く、インパクトも非常に大きい。同じ波長域で使われているガスレーザーや固体レーザーと比べると、圧倒的な小型化・低消費電力化・長寿命化・低コスト化が図れる。一般的なガスレーザーの大きさは1~2メートルだが、半導体レーザーは約1センチメートルと100分の1以下の大きさだ。消費電力も約100分の1で、寿命も約100時間から1万時間と約100倍になる。量産できるようになれば価格も下がり、ガスレーザーの10万分の1以下になるとも期待されている。「これまでの歴史を見ても明らかですが、1つの発見が一気に世界を変えることがあります。このレーザーを使った装置が普及すれば、これまでに見ることのできなかった世界を探索でき

ようになるでしょう」と岩谷さんは力説する。医療・バイオサイエンス分野であれば、DNAの塩基配列を解析するDNAシーケンサーや皮膚治療など、他の波長領域のレーザーではできなかった研究や医療が実現する可能性は大いにある。また、結晶組成を変えれば、中波長領域全ての波長のレーザー光を作れる可能性もあり、すでに国内外の大学、企業との共同研究も進んでいる。岩谷さんもその先頭に立ち、次なる時代を見据えて、さらなる技術革新に向けた研究に日々取り組んでいる。その際も、常に心に留めている座右の銘がある。「教科書を書き換えるような成果が超一流の研究である」。故赤崎博士の言葉である。(TEXT:片柳和之、PHOTO:名城大学提供)

