

# 世界最短波長 342nm の紫外半導体レーザーの発振に成功！

吉田 治正

窒化アルミガリウムを使い、世界最短波長 342nm の紫外半導体レーザーの発振に、浜松ホトニクス株式会社中央研究所の吉田治正主任部員らの研究グループが世界で初めて成功した。半導体レーザーの核心部である発光層の材料にインジウムを含まない新しい結晶構造で、バイオ、環境、加工など幅広い分野で応用が期待される。成果は *Nature Photonics* 2008 年 9 月号<sup>1</sup> に掲載された。研究の経緯、将来展望について吉田主任部員に聞いた。

## 発光ダイオードよりも作製が困難な半導体レーザー

**Nature Digest** — 半導体レーザー (LD) の世界最短波長の更新ですね。

**吉田** — これまでの半導体レーザーの最短波長は、国内の別の研究グループが 2004 年に達成した 350.9nm です<sup>2</sup>。ただ、同じ 2004 年、米国のグループが発光ダイオード (LED) と LD に関連する論文の中で、343nm の発振に成功したことを報告しています<sup>3</sup>。明確なデータが示されていない報告でしたが、我々の 342.3nm は、わずか 1nm 弱とはいえ、この記録をも更新したことになります (図 1)。しかし、重要なのは短波長の記録を更新したことだけではありません。LED では、すでに赤色 (波長 600nm 以上) から深紫外 (210nm) の広範囲のスペクトル領域をカバーしています。構造がシンプルな LED に比べ、LD はレーザー発振のための光を発光層に閉じ込めなくてはならないので、複雑な結晶層構造や深い量子井戸構造にするなど半導体結晶作製の条件が厳しく、

LD は青色 (450~488nm) から紫外 (340nm 程度) の領域に限られていました。けれども今回の成功で、さらに短い波長の可能性が高まったといえるのです。

**ND** — むずかしい短波長の領域の発振に挑み、克服したことになります。

**吉田** — 短波長の LD の実現に欠かせないのは、バンドギャップの大きい半導体材料を使うことです。半導体結晶は、原子どうしがいちばん外側の電子を共有して結合しています。それは「価電子帯」とよばれ、通常、電子が充満しています。ところが、外部エネルギーによって励起されると、共有電子が自由に動ける「伝導帯」に移ります。価電子帯では電子が抜け、正の電荷 (正孔、ホール) ができます。価電子帯と伝導帯の間に、電子が存在できない禁止帯が存在し、価電子帯と伝導帯にはエネルギーの差が生まれます。これがバンドギャップです。ここに電流を流すと伝導帯の電子と価電子帯の正孔が再結合し、バンドギャップ相当の光が放出されます。これを集めて発振させたのが半導体レーザーです。価電子帯にはホール、伝導帯には電子が多くあったほうがいいわけですが、この状態を作り出すのが半導体の PN 接合です。ホールの多い P 型半導体、電子の多い N 型半導体を繋ぎ合わせますが、実際の LD では、発光層をバンドギャップの異なる P、N 型の半導体の層 (クラッド層) で挟みます。LD の光の波長は、バンドギャップに反比例する関係があります。短い波長の光を得るには、バンドギャップの大きい材料を使えばいいわけです。

浜松ホトニクス株式会社

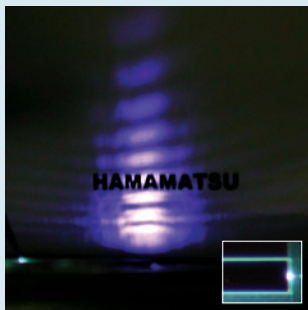
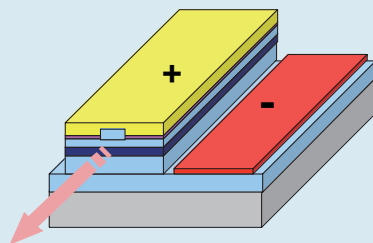


図 1 紫外レーザー光が紙のスクリーンに投影され、青紫色に見える。紙には紫外線に励起される色素があり、レーザー光に反応している。右下の囲みは、発光しているときの実際の半導体レーザー素子を上部から撮影した画像。右側の明るいところが紫外レーザー光。緑色に見えるのは、レーザー光に励起された別の部位が光ったと思われる。

図 2 紫外半導体レーザーの模式図。サファイア基板 (灰色) の上に独自の手法を駆使して、欠陥が少なくクラックのない結晶 (青色、Al 組成 30% の AlGaIn) を成長させていく。電流を流すことで、光は多重量子井戸構造の発光層 (濃い青色、井戸の Al 組成 4%、壁の Al 組成 14% の AlGaIn) に閉じ込められ、発振していく。ピンクの矢印がレーザー光を表す。黄色は P 電極で、赤が N 電極。



## 成功の秘訣は、インジウムを使わない独自の薄膜材料成長法

**ND** — そこで窒化アルミガリウム (AlGaIn) に目をつけたのですか？

**吉田** — これまで、青色 LED や LD の材料として、窒化ガリウムインジウム (GaInN) など III 族の窒化物半導体である窒化インジウム (InN)、窒化ガリウム (GaN) の割合を調整したものが多用されてきました。InN、GaN のバンドギャップはそれぞれおよそ 0.7eV、3.4eV と小さく、理論的に得られる光の波長はそれぞれ 1770nm、365nm です。その点、同じ III 族の窒化アルミニウム (AlN) のバンドギャップは、6.2eV で理論上は 200nm の短い波長が可能になりま



吉田 治正 (よしだ・はるまさ) / 浜松ホトニクス株式会社中央研究所材料研究室主任部員。工学博士。1957年、愛知県生まれ。1980年、三重大学工学部電気工学科卒業。1982年、同大学大学院工学研究科修士課程修了。2003年、同大学大学院工学研究科博士後期課程修了。1982年、ブラザー工業株式会社入社。1985年、浜松ホトニクス株式会社入社、同社電子管事業部勤務。1991年、同システム事業部勤務を経て、2004年より現職。

電子線ホログラフィ研究、ロボットの研究開発、各種光検出器・計測装置の開発、設計製造、光計測装置の企画、営業から販売まで多岐にわたる技術分野と業務を経験。光と物質の相互作用、光の制御に興味があり、窒化物半導体の光応用への可能性について研究。趣味はいわゆるスポーツオタク。過去には自転車ロードレース、トライアスロン、リバーカヤックなどに傾注。今ではエンジン付きに移行してのマリンスポーツやバイクツーリングを楽しむ程度と、おとなしくなったという。

す。ならば最初からアルミニウムを使えばよいということになりますが、そこは簡単にいきません。バンドギャップの大きな材料は、絶縁体に近くなるため電気が流れにくく、また製造がむずかしいという大きな壁があるのです。1000℃以上の高温で結晶を積み上げていきますが、Al組成の異なる、すなわち結晶の格子間隔の異なる層を重ねていく過程で、クラックが入ったり、欠陥が生じたりしてきちんと機能するものができません。また結晶中に「転位」とよばれる欠陥が多くあると、電子がそこにつかまってしまい、発光が非常に弱くなってしまいます。ところが、Inを含むGaInNでは、欠陥があっても発光効率が低下しにくいという特長がありました。そのため、波長の短い光を得るために、発光層にAlとInを含んだ窒化アルミガリウムインジウム (AlGaInN) も使われていました。

先ほど例に挙げた国内研究グループのLDでは、多重量子井戸構造 (MQW) の発光層の井戸にGaIn、壁にAlGaInが使われています。MQWは、LDでは必須といえるものですが、これはバンドギャップの小さいnmオーダーの薄膜材料をバンドギャップの大きい材料で挟んだもの (量子井戸) を複数もつものです。バンドギャップが小さい部分は、電子が閉じ込められることから「井戸」とよばれ、ギャップの大きい部分は「壁」といわれます。我々は昨年、GaInを井戸とするLDを作り355nmの波長を取り出しましたが<sup>4</sup>、GaInでは限界があってその先の短波長が開けませんでした。そのためAlGaInで多重量子井戸構造を作ろうとしたのです。よく光が出るInを含んだAlGaInNでもよかったのですが、Inは波長を長くするため使わないことにしました。

**ND** — 成功の秘訣はどこにありますか？

**吉田** — LDは、発光層のMQWに光を閉じ込めることが必要です。そのため、発光層をバンドギャップの大きいクラッド層で挟むサンドイッチ構造になっています。ギャップを大きくするには、Alの割合を高めなくてはなりませんが、Alの組成を高めるほど欠陥が増えたりクラックが発生したりして、良質な薄膜作製はむずかしくなります。これを可能にしたのが、GaInの結晶構造作製で培った我々独自の技術です。大事なのは、「土台が悪いと上は崩れる」ということです。つまりサファイア基板にGaInの結晶を成長させ、その上に「ファセット制御エピタキシャル横方向異種結晶成長法」という特殊な方法でアルミニウム組成30%の良質なAlGaInの結晶を積層させ良質な土台を作ることに成功しました。発光層もAl<sub>0.04</sub>Ga<sub>0.96</sub>N

を井戸、Al<sub>0.14</sub>Ga<sub>0.86</sub>Nを壁とするMQWができました (図2)。レーザ構造の薄膜の厚さは4μm程度。Al組成の高いクラッド層の屈折率は発光層より低くなるので、光は逃げずに閉じ込められます。こうして発振した光は紫外線なので肉眼では見えませんが、光測定器にレーザ発振の信号が現れたときは本当にうれしかったですね。室温で発振したレーザ光の発光効率 (微分外部量子効率) は8.2%で、まずまずの成果といえます。

### バイオなどさまざまな分野に応用可能

**ND** — どのような分野への応用が考えられますか？

**吉田** — これまで紫外領域の光源は殺菌用の水銀灯、医療用の大型ガスレーザが実用化していますが、使い勝手のよい小型のLDの登場によってバイオ、環境、情報など幅広い分野への応用が期待されます。紫外線によって日焼けすることからもわかるように、特にバイオでは、紫外線領域の光と反応するタンパク質などの物質が多く、紫外領域のLDを使い生体活動を測定することで、生体物質が生命現象にどう関係しているかの解明につながります。例えば、紫外線による日焼けやがんを引き起こす仕組みを解明し、病気予防などに応用できます。病原体監視、有害物質の検出にも有効です。また、現在、高密度の記憶デバイスに用いられるブルーレイ (405nmの青紫色レーザ) の次世代ディスク開発にも光が当てられたと思います。微細で精巧なレーザ印刷、加工、検査などにも使えます。競争は激化しますが、実用化も視野に入れながらの研究はとても楽しみです。

**ND** — 最初から光に興味をもったのですか？

**吉田** — 最初は電子回路やコンピュータが得意で、別の会社に入りました。光を得意とする浜松ホトニクスに転職した後、光計測装置などの企画・営業にもかかわりましたが、広範な経験が今、生きています。研究にもさまざまな経験が重要だと考えています。物作りはたいへんおもしろく、LDで実現していない緑色レーザへの挑戦など、今後も光の可能性を探りたいと思っています。

**ND** — ありがとうございます。 ■

聞き手は、長谷川聖治 (読売新聞科学部記者)。

1. Yoshida H. et al. *Nature Photonics* **2**, 551-554 (2008)
2. Iida K. et al. *Jpn J. Appl. Phys.* **42**, L499-L500 (2004)
3. Edmond J. et al. *J. Cryst. Growth* **272**, 242-250 (2004)
4. Yoshida H. et al. *Jpn J. Appl. Phys.* **46**, 5782-5784 (2007)