

純緑色半導体レーザの開発



企業レポート

中村孝夫*

Development of The World's First True Green Laser Diodes

Key Words : GaN, semiconductor, Laser diode, green, semi-polar

1. 住友電工における化合物半導体への取組み¹⁾

住友電工では、1960年代初頭からGaAs等の化合物半導体のバルク結晶成長に取組み、デバイス作製のベースとなる結晶基板の開発・製品化を行い、化合物半導体の進展に貢献してきた。さらに1970年代後半からは、InP系光通信用光デバイス、GaAs系電子デバイスの研究開発とその事業化を進めてきた。これらの化合物半導体は、Ga、In、Al等のⅢ族元素と、As、P、等のⅤ族元素の組合せからなるⅢ-Ⅴ族化合物であった。1990年代初頭から大きく進展したのが窒化ガリウム(GaN)などの窒化物系化合物半導体である。前述の化合物半導体と同じⅢ-Ⅴ族半導体であり、Ⅲ族元素としてGa、In、Alからなるが、Ⅴ族元素がそれまでとは違ったN(窒素)で構成されている。窒化物系化合物半導体は、高温では高い分解圧で窒素が分解してしまうため、当時バルク結晶は得られず、サファイアなどの異種基板上へのヘテロエピによるデバイス作製が先行した。1993年にサファイア基板上にエピ成長した青色LEDが公表され、日本を中心に世界的に研究開発が加速された。当社では、窒化物半導体に対しても、ベースとなるバルク結晶開発に着手した。当時でもGaNのバルク成長は、数万気圧の高温超高压状態での結晶成長法の研究が行われていたが、大口径化が困難で、かつ量産性が低いと考えられていた。

当社では、それまでに培って来た気相合成法であるHydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE)適用を主に進めた。HVPEによるエピタキシャル成長により、下地基板上に高速で厚くGaNの結晶成長を行い、その後下地基板を除去するという独自のバルク結晶を得るプロセスにより、初めて2インチ径のGaN基板の開発に成功した(図1)。その後、GaN基板技術を量産技術まで高めるとともに、2009年には独自GaN基板技術により、世界初の半導体緑色レーザ発振に成功した。本報告では開発内容とその後の進展について紹介する。

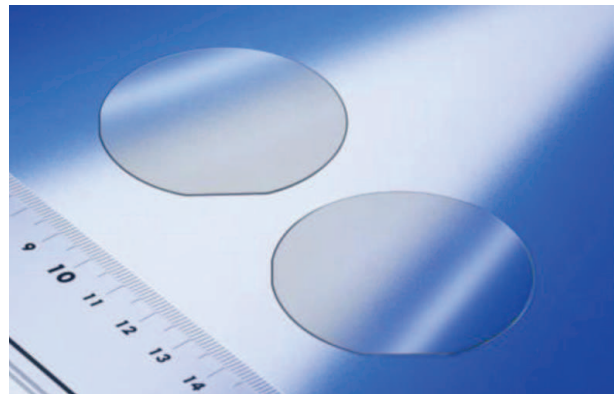


図1 HVPE法で作製したGaN基板

2. 緑色レーザ開発状況

近年、半導体発光素子を光源としたTVやプロジェクタなどの映像表示機器が市場を賑わせている。LEDをバックライトに用いた液晶TVが普及期に入る一方、新たな製品として現在注目を集めているのが超小型プロジェクタである。2008年頃から市場に登場し始めた手のひらサイズのプロジェクタ単体やプロジェクタ搭載の携帯電話は大きな反響を呼んでおり、これらが市場に受け入れられる新しい価値であることを示した²⁾。小型プロジェクタ用の光源



* Takao NAKAMURA

1961年10月生
京都大学大学院工学研究科修士課程修了
(1986年)

現在、住友電気工業株式会社 半導体技術研究所 半導体デバイス研究部 部長
博士(工学) 半導体デバイス

TEL: 072-771-0987

FAX: 072-771-0407

E-mail: nakamura-takao@sei.co.jp

にはレーザとLEDの2種類がある。レーザは、光学部品を削減でき小型化しやすい、色再現範囲を拡大可能、といった特徴がある。カラー映像を表現するためには、光の三原色であるR(赤色)・G(緑色)・B(青色)が必要であり、赤色と青色については半導体レーザが既に実用化されている。しかし、緑色についてはレーザ発振自体が実現されていなかった。そのため、緑色レーザとしては赤外光の波長(1064 nm)を第2高調波発生(SHG)素子を使って半分に変換(532 nm)するものが用いられている。これに対し、半導体によって直接レーザ光を得ることができれば、小型、低コスト、高効率な光源を実現可能であり、大きな波及効果をもたらすものと期待できる。このために、半導体による緑色レーザの開発が非常に活発化している。

3. 緑色レーザ実現への課題：グリーンギャップ

緑色発光を可能にする半導体材料は、窒化ガリウム(GaN)と窒化インジウム(InN)の混晶から成るInGaNである。InGaNはIn組成の調整によって可視光全域をカバーできる材料であり、具体的にはIn組成の増加に伴い紫色(波長400~435 nm)、青色(波長435~480 nm)、緑色(波長500~560 nm)のように発光色が波長の長い方向に変化する。これまでに青紫色レーザ、白色LEDなど様々な発光デバイスが実用化されてきた。しかし、発光色が青色から緑色へと長波長化するに従い発光効率が低下し、レーザに関しては発振が難しくなる。一方、さらに波長が長い赤色領域で使用されているAlGaInP系

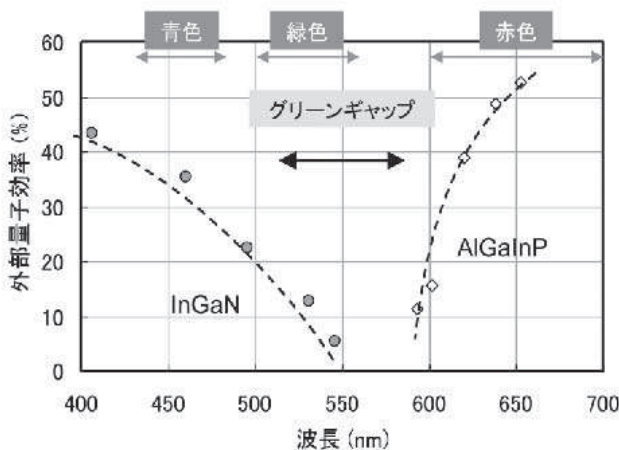


図2 半導体材料におけるグリーンギャップ

の材料も短波にすることで発光効率が低下することから、図2に示すように、可視光の中で緑色領域でのみ発光効率が低くなる課題があった。この課題は半導体材料における「グリーンギャップ」と呼ばれていた²⁾。

図3にGaNの結晶構造、発光素子構造を示す。発光素子は、半導体基板の上にエピタキシャル層を結晶成長して作製される。既に実用化されているGaNのLEDやレーザはすべて(a)のc面上に作製されたものである。緑色の発光を得るためには、発光層を構成するInGaNのIn組成を高める必要がある。これに付随して、レーザ発振を阻害する2つの課題が顕在化する。1つ目の課題は、発光層内部に発生するピエゾ電界が大きくなることである。ピエゾ電界とは、InGaNが成長面内方向に圧縮歪みを受ける時に、正の電荷を持つGa及びInと負の電荷を持つNの分極のバランスが崩れることに起因して、c軸方向に生じる電界のことである。このピエゾ電界により電子と正孔の波動関数の重なりが小さくなり、電子と正孔が発光再結合する遷移確率の低下、すなわち発光効率の低下を招いてしまう。2つ目の課題は、InGaN発光層の高In組成化に伴い結晶品質が劣化しやすくなることである。これは、格子定数が大きく異なるGaNとInNが非混和性を示すことに由来しており、凝集したInが非発光性の欠陥を発生させ、結晶品質が悪化し、発光効率が低下してしまうのである。

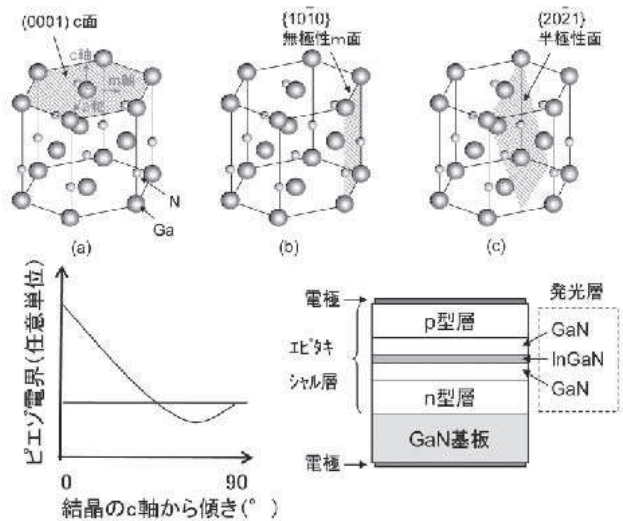


図3 GaN結晶面とピエゾ電界の関係、発光素子構造

4. グリーンギャップの克服

piezo電界はc軸方向に発生するため、c面から傾いた方向にレーザ構造を作製することでpiezo電界の影響を低減することが可能になる。c面から90度傾けた図3(b)に示すm面やa面は、結晶成長する方向のpiezo電界がゼロであるため、無極性面と呼ばれ、広く研究がなされてきた³⁾。しかし、これらの面方位においても上記2つ目の課題であるInGaN発光層の高品質化は依然克服できていなかった。我々はpiezo電界がゼロにしなくても、高In組成InGaNの高品質結晶成長の実現にも重きを置き、緑色レーザに適した新たな結晶面を開拓することにした。そして、図3(c)に示すc面から75度傾いた $\{20\bar{2}1\}$ 面という独自の面方位を見出した。この面ではその表面原子配列などに起因して、特異的に結晶へのInの取り込まれが促進されるとともに、高品位のInGaN層が成長可能である。piezo電界もc面に比べ低くすることができる。高品位なInGaN層が成長できていることは発光スペクトルの半値幅が他の結晶面に比較して全波長領域で小さいことや電子顕微鏡でのInGaN発光層の観察から発光層近傍に欠陥が認められないことに加え、井戸層界面が非常に急峻であることが分かる(図4)。さらにc面に比べてレーザに適した特性をもっていることを基礎物性評価から明らかにしている。

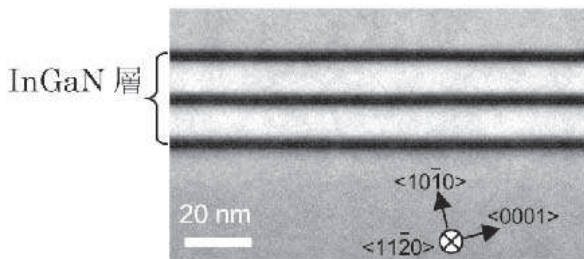


図4 緑色レーザ構造断面電子顕微鏡写真

5. 純緑色レーザの発振

$\{20\bar{2}1\}$ 面では高品位のInGaN層は成長できるが、レーザを作製するため、その結晶構造に起因したエピ成長材料の選択と最適化や結晶の加工などの課題も存在した。これらの課題を克服することで、2009年7月に531 nmと純緑色レーザの発振に成功し(図5)、実用化の必要条件である連続発振を8月に達成した。現在発振波長は536.6 nmとSHGレーザを越

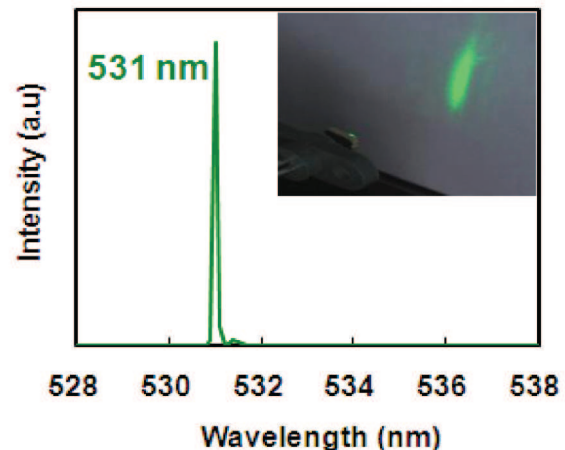


図5 世界初純緑色半導体レーザ発振

えている。さらに、この結晶面ではc面に比べ低電流で且つ高温でのレーザ発振ができ携帯機器の搭載に有利であることを明確化した⁵⁾。最近、効率、出力、信頼性についても実用上問題ない結果を得た(ソニーとの共同開発)^{6,7)}。

6. 今後の展望

独自の材料開発により $\{20\bar{2}1\}$ 面上のInGaN発光層の高品質化による世界初の緑色レーザ発振に成功した。我々の発表を契機に開発競争がさらに激しくなっている。これまでのレーザ開発からも同時進行的に特性が改善することは実用化に近いことを示しており、緑色レーザは製品搭載されることはほぼ間違いない状況である。光の三原色のレーザ光源がすべて半導体で実現できることになり、映像表示機器はもちろん、新たな応用製品への展開が期待できる。

7. 文献

- 1) 元木、SEIテクニカルレビュー、No. 121, 2012, pp.40-49
- 2) 根津、日経エレクトロニクス、2006年8月14日号、pp.65-70
- 3) 川上、OPTRONICS、9 (2009)122
- 4) Y. Enya et. al., Appl. Phys. Express 2 (2009)082101
- 5) M. Adachi et. al., Appl. Phys. Express 3 (2010) 121001.
- 6) S. Takagi et. al., Appl. Phys. Express 5 (2012) 082102
- 7) K. Yanashima et. al., Appl. Phys. Express 5 (2012)082103