# photonic frontiers

短波長半導体レーザ

## 実用的な緑色半導体レーザの探究

ジェフ・ヘクト

実験室の窒化物レーザは極めて重要な帯域である520~530nmに到達した。現在の開発者たちは、実用的な緑色半導体レーザの製造に必要となる完全な生産技術の開発にしのぎを削っている。

半導体レーザのより短い波長の探究は、ヒ化ガリウム(GaAs)の発光を赤外(IR)から可視の赤色波長へと広げる努力から始まり、その結果、現在の広く使われているGaAs基板上のリン化ガリウムインジウム(GaInP)またはリン化アルミニウムガリウムインジウム(AlGaInP)の活性層から成る赤色半導体レーザが誕生した。赤色の次は青色への難しい研究となり、中村修二氏が1995年に、窒化インジウムガリウム(GaInN)からの405nmの半導体レーザの作製に成功した。

青色窒化物レーザは輝かしい成功を 収めたが、半導体レーザのスペクトル の中央には緑色のギャップが残され た。このことは、真の緑色半導体レー ザを必要とする新しい応用、とくにフ ルカラーレーザディスプレイを開発す る際の大きな問題として浮上した。ネオ ジム(Nd)固体レーザによる532nmへ の周波数2倍化は緑色のギャップ問題 を一時的に解決できるが、ディスプレイの開発者たちは小型で直接変調可能な緑色半導体レーザが必要であった。また、半導体レーザは発振スペクトルの帯域幅が広いため、可視ディスプレイの邪魔になるレーザスペックルの抑圧にも必要であった。現在の緑色半導体レーザは実験室でのレーザ発振に成功している。しかし、実用的な緑色レーザを実証するには技術的な開発競争が残されている。

#### 青色から緑色へ

緑色半導体レーザはヒ化物やリン化物に比べると大きな直接遷移バンドギャップが必要になるが、赤色および青色半導体レーザとの適切なカラーバランスを実現するには、GaInNによる520~530nmバンドの発光が必要になる(図1)。しかし、残念なことに、活性層のバンドギャップを520~530nmバンドに対して十分に近づけるには、イン

ジウム濃度を(ガリウム濃度に比べて) 30%も高くして、Gao.7Ino.3Nの組成にしなければならない。

ところが、活性層のインジウム濃度が15%を超えると、半導体結晶はレーザ動作を損なう欠陥の発生が問題になる。2008年の段階では、このことが青色(488nm)よりも長波長の半導体レーザの実現を困難にしていた。2009年の初めになると、開発者たちはこの障壁を克服し、500nmで発光するGaInN半導体レーザを実証した。GaN基板上にレーザ構造を成長させる2種類のアプローチが成功し、両者は現在も競争を続けている。

通常の窒化ガリウムは、一般にGaInN 半導体レーザの基板として役立つ六方 晶系ウルツ鉱型の結晶構造になる。青 色および紫色半導体レーザの多くは六 方晶系構造のc面上に成長する(図2)。 この選択は便利だが、この結晶に固有 の極性によるc面に垂直な大きな内部 電場が発生し、窒化化合物に成長する 量子井戸中の電子と正孔の波動関数が 分離する。その結果、この量子閉じ込 めシュタルク効果と呼ばれる分離によ って、電子と正孔の再結合速度が減少 し、半導体レーザとLEDに発光効率 が低くなる<sup>(1)</sup>。しかしながら、このよ うな分離は再結合時の光子エネルギー の減少を引き起こすため、面倒なこと の原因となるインジウム濃度を増加し なくても、青色からの長波長化が可能 になる。独オスラム オプトセミコンダ

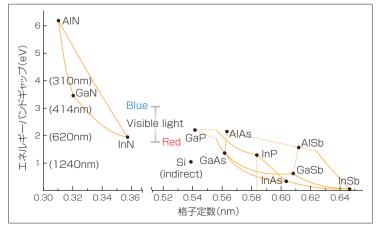


図1 III-V半導体のなかで窒化物だけが緑色と青色の波長に対応できるバンドギャップを持っている。

クターズ社(Osram Opto Semiconductors)は、このアプローチを用いて500 nm に到達した<sup>(2)</sup>。

図2に示すように、その他のGaN結 晶面も極性が低く、無極性の場合もあ り、これらの結晶面もレーザ構造の成 長の代替面になる。加面と呼ばれる六 方晶系の側面は無極性だが、その作製 は難しい。c面と結晶軸に対して45°カ ットの半極性と呼ばれる面は、極性が c面よりも低く、容易に作製できる。半 極性または無極性の面上へのレーザ構 造の成長は電子と正孔の波動関数がほ ぼ整合した状態に保持されるため、発 光効率が増加する。一方、所望の波長 に到達するには、インジウム濃度の増 加が必要になる。ロームはこのアプロ ーチを使用して、オスラム社よりわず かに早く500nmに到達した<sup>(3)</sup>。これ らの二つのアプローチは、青色から 525nm 近傍への長波長化の競争の先 頭を走っている。

### 低極性基板

ロームのグループと米カリフォルニア大学サンタバーバラ校(UCSB)教授の中村氏のグループは、いずれも青色半導体レーザを試作し、低極性基板の効果を試験している。低極性基板が青色レーザの効率と出力パワーを改善することを明らかにした後、中村氏、ジェームス・スペック氏(James Speck)、スティーブン・デンバース氏(Steven DenBaars)は、2008年の初めに半導体レーザの技術を開発する米カーイ社(Kaai)を設立した。彼らは2010年にカーイ社を関連ベンチャー企業の米ソラー社(Soraa)と合併させている。

現在までに、彼らは最高0.5Wの単一モードが25%のウォールプラグ効率で発生する405nm紫色半導体レーザと、0.75Wの単一モードが $23\sim24$ %のウ

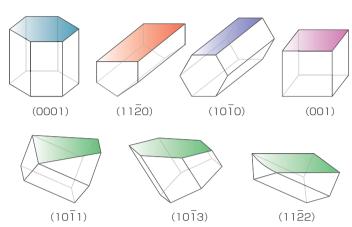


図2 極性をもつウルツ鉱GaN結晶のいくつかの一般的な成長面を面方位記号と一緒に示している。半極性の成長面は結晶の対角線に沿ったカットから得られる。

オールプラグ効率で発生する青色半導体レーザを作製した。両者の効率はc面基板に比べると数%高いが、彼らの実際の目標は緑色半導体レーザにある。ソラー社のポール・ルディ氏(Paul Rudy)は「長波長を実現するには強硬にインジウム濃度を増やさなければならない」と語っている。ルディ氏によると、低極性基板は電子と正孔がより近接するため、設計者がレーザ材料を選択する際の柔軟性が増す。しかし、ルディ氏はソラー社が使用している材料と、それが無極性か半極性かについては口を閉ざしている。

ソラー社は2010年1月に開催された Photonics Westにおいて(当時はカー イ社として)523nmレーザを報告し、そ の後は532nmや535nmといった波長 への長波長化ではなく、パワーと効率の 向上を追及している。ルディ氏は「現 在、われわれは最大60mWを達成し、 520~525nmの範囲に注力している」 と語っている。これは2010年初めに 比べると、連続波(CW)パワーの約10 倍の改善になる。ウォールプラグ効率は 2%にすきないが、ソラー社はその改善 を進めている。ルディ氏は「商品化の 成功には8%のウォールプラグ効率が 必要になるが、われわれは2011年中 に10%以上が可能になると考えている」 と語っている。Photonics West 2010で

約束したように、ソラー社は緑色レーザ のサンプル出荷を開始した。

信頼性は最重要の問題になる。ごく 最近、ソラー社は緑色半導体レーザ寿 命の予備試験を開始したが、低極性基 板上の青色レーザの試験では1万時間 以上の寿命が証明されている。緑色レ ーザも同様の寿命を達成したと予想さ れるが、ルディ氏はその詳細を語ろう とはしなかった。

#### c面極性基板レーザ

極性基板を支持する人たちは異なる 平衡状態に注目している。つまり、電 子と正孔の重なりが減少すると光子エ ネルギーも減少し、より低いインジウ ム濃度でも長波長へのシフトが起こ る。オスラム社のアドリアン・アヴラメ スク氏 (Adrian Avramescu)らは、極 性GaN基板上に成長する3nm量子井 戸について計算し、531nm レーザに必 要なインジウムの量が無極性GaNの場 合の34%から30%へ減少することを見 出した(図3)(4)。量子井戸の厚みも重 要になる。量子井戸の厚みが2.5nmか ら3nmにまで増えると、与えられた波 長の生成に必要なインジウムの量は約 1.5%の減少になる。

しかしながら、量子井戸の厚みが増加すると、極性量子井戸中の電子と正孔の重なりが減少し、それらの再結合

### ◆ photonic frontiers 短波長半導体レーザ

速度とモデル利得も減少するトレードオフが起きる。オスラム社のウベ・ストラウス氏(Uwe Strauss)らはPhysica Status Solidi Bのオンライン論文のなかで、「極性量子井戸を用いる設計には、4nmの広い量子井戸中の低いインジウム濃度と、2nmの狭い量子井戸中の電子と正孔の強い重なりとのトレードオフがある」と書いている $^{(5)}$ 。とは言いながら、彼らは結論として「[極性] c 面を使いこなした素子は最高の性能が得られる」と述べている。

オスラム社はブロードエリアc面レーザの25℃での実験を行い、531.7nmのパルスレーザ動作が6%のデューティサイクルで得られることを実証した。この実験に基づいて、彼らは緑色レーザの制約要因がc面基板の高い極性ではなく、高インジウム濃度GaInN量子井戸の結晶品質によるとの結論を述べている。524nmで発光するCWリッジ導波路レーザは出力パワーが50mWのときのウォールプラグ効率ピーク値が2.3%に達している。

#### 将来展望

緑色半導体レーザの開発競争にはあたかも競馬のような面白さがある。住友電気工業と日亜化学工業も緑色レーザを報告している(表1)。ソニーも緑色レーザを研究しているが、詳細についてはほとんど語っていない。

有望な新しいアイデアも進行中である。米カーネギーメロン大学(Carnegie Mellon University)のエリアス・トウ氏(Elias Towe)は、最良の基板は四元化合物のGaossIno.15Nになるだろうと主張している。この化合物半導体は緑色半導体レーザの基板ばかりでなく、赤色および青色レーザの基板としても役立つ<sup>(6)</sup>。したがって、カラープロジェクタに必要な赤色、緑色、青色の3原

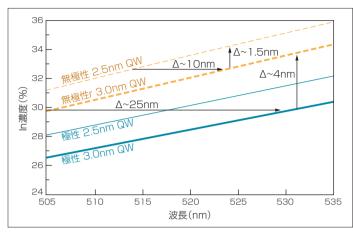


図3 2極性基板と 無極性基板を用いた 2.5 および3nm厚 の量子井戸の半導体 レーザにおける発振 波長とインジウム濃 度との関係を示して いる。(アヴラメス ク氏らの2010年 の論文(4)から引用)

表1 報告されたGaInN緑色半導体レーザの性能

グループ	基板	CW/パルス	波長(nm)	出力(mW)	ウォールプラグ効率(%)
カーイ/ソラー	N/A	CW	522	30	0.8
カーイ/ソラー	N/A	CW	525	6.5	0.25
オスラム	極性	CW	524	50	2.3
オスラム	極性	パルス	531.7	N/A	N/A
住友電気工業	半極性	CW	520	2.5	0.22
住友電気工業	半極性	パルス	531	N/A	N/A
UCSB	半極性	パルス	516	7	N/A
日亜化学工業	極性	CW	510~515	8	~1
ローム	半極性	CW	500	16	0.5

太田氏らの論文(7)から引用

色レーザの作製が単一基板上のモノリシック構造で可能となり、簡単で安価な素子を実現できる可能性がある。このことは将来に向けた興味深い可能性を示している。

緑色半導体レーザの目の前にある目標は性能の改善であり、眼の緑色光に対する高感度が利点となるディスプレ

イなどの用途に必要なパワーと信頼性を確保しなければならない。UCSBの太田裕朗氏、デンバース氏、中村氏は緑色半導体レーザの将来に関する新しい論文のなかで、これらの目標の実現には「緑色の[内部効率]を改善して現在の30~40%よりも高めることが最重要課題になる」と述べている(7)。

#### 参考文献

- (1) J.S. Speck and S.F. Chichibu, "Nonpolar and Semipolar Group III Nitride-Based Materials," MRS Bulletin, 34, 304-313 (May 2009).
- (2) D. Queren et al., Appl. Phys. Lett., 94,081119(2009).
- (3) K. Okamoto, J. Kashiwagi, T. Tanaka, and M. Kubota, "Nonpolar m-plane InGaN multiple quantum well laser diodes with a lasing wavelength of 499.8nm," Appl. Phys. Lett., 94, 071105-1-71105-3(2009).
- (4) A. Avramescu et al., "True green laser diodes at 524 with 50mW continuous wave output power on c-plane GaN," Appl. Phys. Exp., 3, 061003(2010).
- (5) U. Strauss et al., "Pros and cons of green InGaN laser on c-plane GaN," Physica Status Solidi B, doi: 10.1002/pssb/201046299(2010).
- (6) T.K. Sharma and E. Towe, "On ternary nitride substrates for visible semiconductor light emitters," Appl. Phys. Lett., 96, 191105(2010).
- (7) H. Ohta, S.P. DenBaars, and S. Nakamura, "Future of group III nitride semiconductor green laser diodes," J. OSA B, 27 B45(November2010).

LFWJ