

## IWN2010 ショート速報 [光デバイス・ナノ結晶]

菊池 昭彦 (上智大学)

会議名 : International Workshop on Nitride Semiconductors

開催期間 : 2010年9月19日-24日

開催場所 : Tampa Marriott Waterside Hotel &amp; Marina, (Tamp, Florida, 米国)

\*\*\*\*\*要 約\*\*\*\*\*

本会議は窒化物半導体に関する最大級の国際ワークショップであり、幅広い分野にわたる12のテクニカルセッションに分かれて発表と討論が行われた。筆者が主に出席した光デバイスとナノ構造の各セッションでは、半極性/非極性面上の青～緑色光デバイスや紫外線LEDの最近の進展状況が報告され、LEDのドループ現象やLDの劣化機構など未解決の課題も論じられた。ナノ結晶分野は、選択成長による位置制御技術や電流注入LEDが複数の機関から報告され、デバイス応用を目指した研究段階に入りつつある。また、ピコ秒高出力青色レーザやテラヘルツ光源、熱電変換素子等の新規デバイスも報告され、活発な議論が交わされた。

\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

IWNは隔年で開催される窒化物半導体全般を対象とする最大級の国際会議の一つであり、5回目となる今回は米国フロリダ州のタンパで開催された。会議は、全員が参加するキーノートセッションが3日間、トピカルな領域について深い議論の場を提供するという主旨による12のテクニカル(パラレル)セッションが2日間、その間に5つのテーマに分かれた特別ランプセッションと3回のポスターセッションで構成された。

テクニカルセッションのテーマは、エピ成長(100)、バルク結晶(17)、物性(84)、デバイスプロセス(29)、欠陥・構造評価(50)、理論とシミュレーション(32)、ナノ結晶(61)、光デバイス(89)、電子デバイス(64)、太陽電池(22)、センサーとMEMS(13)、製造(3)、新材料(39)と幅広いものであった。括弧内はそれぞれのテーマの口頭発表とポスター発表の合計件数である。アブストラクトは719件(口頭発表385件、ポスター239件)、登録者793人(北米305、アジア255、ヨーロッパ204)と比較的大規模であり、窒化物半導体分野は依然として活況であることがうかがわれた。(個別集計値はレイトニュースを含まず、当日の発表、プログラム、HPなど複数ソースからのデータのため、合計が一致しない点をご容赦ください。)

本稿では、筆者が主に参加した光デバイスとナノ結晶のセッションを中心に、興味を持った幾つかのトピックスについて主観的を交えて報告する。

## 2. 光デバイス

## 2.1 極性/半極性/非極性上の青～緑色LED/LD

UCSBのSpeck教授は、非極性/半極性面上の発光デバイスに関するレビューを行い、半極性/非極性面上LEDのEQE(External Quantum Efficiency: 外部量子効率)は、GaN基板の採用により貫通転位と積層欠陥が低減したことによって著しく改善し、m面から $0.8^\circ$ のミスカット基板を用いることでヒロック形成を抑制した鏡面のGaN成長が可能となった経緯を述べた。また、InGaN量子井戸ではc面からの傾斜を大きくするとc

面に比べて大きな光学利得が期待されることや、半極性面上のLDでは利得の異方性により共振器の形成方向によって発振特性が大きく異なるという理論解析等を紹介した。また、最近の成果として、(11\_22)面黄色LEDで20%を越えるEQE、同大学が関係しているKAAI社の青色LDでWPE (Wall Plug Efficiency: 電力変換効率) 18%、波長 512nmの緑色LDでシングルモード出力 30mW、波長 525nmにおけるCW発振が得られていることなどを報告した。

ドイツのOSRAM社はc面基板上に成長した緑色LDの最近のデータを報告し、波長 531.7nmの利得導波型構造ではパルス発振でしきい値電流密度 $J_{th}=18\text{kA/cm}^2$ 、波長 524nmのリッジ構造ではCW発振で $J_{th}=8.9\text{kA/cm}^2$ 、出力 50mWであった。緑色レーザは、2009年に500nm帯での発振が報告されたばかりのホットなトピクスだが、今回は日亜化学と住友電気からの報告はなかった。

同じくOSRAM社からは、波長 405nmの近紫外LED表面にInGaN多重量子井戸薄膜をシリコン樹脂で貼り付け、近紫外光によりMQWを励起する構造の緑色LEDが報告された。緑色LEDに遜色ないEQE (20~30%)を示し、高電流域でのドループも少ない。現状では通常の緑色LEDと同程度の光出力であるが、高効率緑色LED実現に向けた有力なアプローチの一つとして期待される。

筆者の知る限り、現時点で緑色LEDはc面上、緑色LDは(11\_22)面上でトップデータが報告されている。半極性/非極性基板の優位性は活性層のIn組成が大きくなる緑色域で顕著となると期待されるが、その効果はピエゾ電界の抑制効果のみではなく、組成揺らぎと欠陥の少ない高品質な緑色InGaN-MQWの結晶成長が可能となることが特に重要である。

### 2. 3 紫外線 LED

DUV (Deep UV: 深紫外) -LEDでは、NitekとSouth Carolina大がチップサイズ  $500\times 500\mu\text{m}^2$  (p-contact領域:  $180\times 180\mu\text{m}^2$ ) のmicro-pixel型LEDで波長 280nmのCW動作下で出力  $52\text{mW}@0.7\text{A}$  (EQE=2%)、電子冷却時  $100\text{mW}@1.6\text{A}$ 、パルス動作時は室温非冷却時でも  $233\text{mW}@1.2\text{A}$  という優れた特性を報告した。結晶成長やデバイス技術に加えパッケージングなどの総合的な改良が功奏し、素子寿命も3000hrを超えてDUV-LEDの性能が急速に向上していた。理研のグループは、変調型MQB (Multiple Quantum Barrier: 多重量子障壁) の導入によって250nm帯DUV-LEDの電子注入効率 (Electron Injection Efficiency: EIE) が22%から75%へと著しく改善し、247nmLEDでEQE=1.8%、263nmLEDでは室温CWで22mWの出力を得た。波長280nm近傍のDUV-LEDの効率は複数の研究機関で2%台が報告されるに至り、未着手の光取出し効率の改善方法が開発されれば10%に迫るEQE値も近いうちに達成されそうな勢いである。高効率DUV-LEDが広く活用され得る応用分野の開拓が望まれる。

### 2. 4 可視高輝度 LED のドループ

注入電流の増加に伴って発光効率が低下するドループ現象は、高輝度LEDにおける深刻な問題である。UCSBのVan de Walleは第一原理計算によりフォノンアシストによる間接的オージェ再結合が寄与するモデルを報告した。一方、京大の金田は、デュアルプローブSNOM (走査型近接場光学顕微鏡) を用いて、緑色発光InGaN量子井戸層ではIn組成の大きな局在中心に非発光再結合中心が存在し、キャリア密度の増加に伴うバンドフィリングによって非発光中心に流れ込むキャリアが増加することが緑色LEDのドループの一因であると提案した。LEDのドループ現象に関しては、上記以外にもキャリアによるポテンシャルバリアのスクリーニング効果やキャリアオーバーフローなど、幾つかのモデルが提唱されているが、統一的な解釈は

なく、しばらく論議が続きそうである。一方、ドループを抑制する有効な手段は活性層のキャリア濃度を下げることであり、ロシアの Ioffe と Epi-Center のグループは、InGaN/GaN 短周期超格子を活性層とする波長 450nm の LED において注入電流 1A までドループを 20%以下に抑制した。InGaN バルク活性層の採用もキャリア密度の低減に有効だが、通常の LED 構造では臨界膜厚の点で困難である。高 In 組成でも活性層を厚くできるナノコラム LED は、低ドループ性が期待できるかも知れない。

## 2. 5 InGaN 系 LD の劣化機構

InGaN 系 LD の長期劣化は駆動時間の平方根に依存する特性を示すことが知られているが、その機構はまだ完全には理解されていない。Inst. High Pressure Phys. は、窒化物 LD の加速寿命試験を行って、ストレス印加前後の特性を比較した結果、端面劣化やドーパントの拡散、ダークスポットの拡大、スロープ効率の変化などは確認されず、しきい値のみが増加するという結果を示した。これらを検討して、長期劣化の原因は垂直あるいは横方向のリーク電流増加の増加、すなわち活性層に達するキャリア数が減少するためであると説明した。一方、Padova 大と Panasonic は、同一基板上に LD と LED-Like デバイス（リッジ構造と端面反射鏡がない点で LD と異なる）を作製して劣化に伴う電気特性と光学特性を詳細に比較したところ、両者とも同様な劣化を示し、長期劣化の原因は点欠陥など増加による活性層における非発光再結合電流の増加であると考察した。

両者の結果を考察すると LD の長期劣化は、非発光再結合成分の増加による垂直方向リーク電流の増加による可能性が高く、これは劣化前後の活性層の PL 強度を比較すること等で確認できそうである。

## 2. 6 高出力ピコ秒パルスモードロック青色レーザ

ソニーと東北大学から、過飽和吸収帯を設けた InGaN 系青色 LD と 15cm の共振器で構成したモードロックレーザで発振させた波長 405nm、ピーク出力 4W、パルス幅 4ps、繰り返し周波数 1GHz のレーザ光を InGaN 系 SOA によりピーク出力 100W、パルス幅 3ps に増幅する高出力ピコ秒光源が報告された。この光源を用いた二光子吸収による記録メディアへ書き込み結果（マークサイズ：350nm×280nm）も報告した。100 時間以上の動作は確認済みで本質的に安定なシステムであると述べ、次世代高密度記録メディアへの応用やレーザ加工、計測など広い分野に応用可能な技術として大いに期待される。

## 3. ナノ構造

### 3-1. ナノコラム／ナノロッド／ナノワイヤ（本稿ではいずれも同義）の光デバイス応用

Madrid 大の Calleja 教授が MBE 法（Molecular Beam Epitaxy：分子線エピタキシー法）による GaN 系ナノ結晶についてキーノートレビューを行い、成長機構や選択成長技術による規則配列成長、ナノワイヤ LED の最近の進展を報告した。CNRS のグループは、InGaN/GaN ナノワイヤの微細構造解析を行い、ナノワイヤは高 In 組成の InGaN でも欠陥の導入が少なく、高品質化に有利であることを示した。デバイス寄りの発表では、上智大が MBE 法で選択成長した規則配列 InGaN/GaN ナノコラムアレイの波長 532～560nm の緑色域光励起誘導放出や波長 540nm の緑色規則配列ナノコラム LED を報告した。また、Braunschweig 大が MOCVD 法（Metal Organic Chemical Vapor Deposition：有機金属気相成長法）を用いてナノインプリントと光露光でナノパターンを形成した 2 インチ GaN テンプレート上にコアシェル型青色 InGaN/GaN 規則配列ナノ LED アレイを成長し、1 本のナノ LED への電流注入発光を観測した。この他にも複数の機関から選択成長による GaN

ナノ結晶の規則配列や電流注入LEDの報告がなされ、実用的な光デバイス応用を意識した研究が増えてきた印象を受けた。特に、欧州ではOSRAM社等を中心としてナノワイヤLEDの開発が本格的に始まったようである。

### 3-2. 単一ナノ結晶のフォトニックデバイス応用

東京大学の有田らは、6H-SiC基板上にSiO<sub>2</sub>マスクを用いて、MOCVD法で周期300nm、直径110nmのGaNロッドアレイを成長した。この上にAlN/GaN/AlN層を成長することでGaN量子ドットを埋め込み、4Kで半値幅~5meVのシャープなPL発光を観察し、単一光子光源への可能性を示した。また、Michigan大は、Si基板上に成長した1本のGaNワイヤをSiO<sub>2</sub>とTiO<sub>2</sub>で埋め込み、周囲に直径40nm周期130nmのエアホールを形成したフォトニック結晶微小共振器を作製し、150kW/cm<sup>3</sup>での光励起発振を報告した。

これらの報告は、ナノ結晶の微小体積を利用した新デバイスの可能性を探る興味深いものであった。

### 3-3. 量子カスケードデバイス

理研の寺島は、MBE法で成長したGaN/AlGaIn-QC(量子カスケード)構造から1.37THz(波長225μm、出力20pW)の電流注入テラヘルツ自然放射光の観測を報告した。今回は、GaN基板の利用、成長法の改善および量子井戸周期の増加によって従来に比べ出力が10倍に向上して波長の測定が可能になった。観測値(1.37THz)と設計値(7.5THz)が大きく異なっていたが、この理由は検討中とのこと。窒化物半導体を用いることにより、GaAs系などの従来材料ではLOフォノン制限によって室温発振が困難な波長帯(5~12THz)におけるTHz-QCL(テラヘルツ量子カスケードレーザ)の実現に向けた大きな前進である。

## 4. レイトニュース

1) GaNエピタキシャル膜で一般的に観察される黄色発光に関する理論モデルが提案された。黄色発光の起源は1つではなく、n-GaNではGa欠損に起因し、SI(半絶縁性)-GaNやp-GaNでは窒素サイトのCが寄与しているという。黄色発光の抑制や結晶の高品質化における指針として有用であろう。

2) Al<sub>0.83</sub>In<sub>0.17</sub>N(n=5x10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>)を用いた熱電変換素子(SiO<sub>2</sub>/AlInN/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)において、室温でのZ\*T値(性能指数)0.532が報告された。この値は、他の材料も含めて室温におけるトップデータであるとのこと。窒化物半導体の応用分野はエネルギー・ハーベストにも広がってきたことが認識された。

## 5. おわりに

本会議に参加して、窒化物半導体は従来デバイスの着実な性能向上に留まらず、上述のような新規デバイスの開発も積極的に行われており、更なる応用範囲の拡大が期待される材料であることを実感した。

IWN2010では、パラレルセッション形式で特定のテーマに関心のある研究者が集まって深い議論が行われることが大きな特徴であった。一方で、興味のある発表が複数並行して行われる場合が多く全てを把握できないという問題があり、会議の運営方針の難しさを感じた。最終日にWorkshop Highlightsとして各テクニカルセッションの担当者によって総括が報告されたので、大雑把な全体像は把握できた。

今回のIWN2012は、2012年10月14日~19日に北海道札幌コンベンションセンターで開催予定である。

以上