

ISSLED2008 ショート速報[ワイドギャップ半導体光デバイス]

菊池昭彦 (上智大学)

会議名 : International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED2008)

開催期間 : 2008年4月28日-5月2日

開催場所 : Hyatt Regency Phoenix (Phoenix, AZ, 米国)

*****要約*****

窒化物系 LED の高性能化に関する発表が多く、青色 LED と緑色 LED では非極性面/半極性面結晶の高品質化による発光効率の向上やナノ構造等を用いた光取出し効率の改善、大電流動作時の効率低下 (ドループ) メカニズムに関する報告などがあり、議論が行われた。紫外 LED では結晶性の向上に伴う短波長化と高出力化が報告された。演色性に優れた新しい白色 LED 構造の提案、ZnO やナノ結晶等の次世代光デバイスの可能性を探る研究も多く報告された。

1. はじめに

本会議は 1996 年から隔年で開催されてきた International Symposium on Blue Laser and Light Emitting Diodes (ISBLLED) を継続するものだが、今回から International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED) と改称された。参加者は約 140 名で、論文件数はプレナリ、レイトニュースを含めて 101 件 (キャンセルを含む)、口頭発表のみのシングルセッション構成となり、内容的には従来に比べ窒化物 LED の割合が多くなった印象がある。前回の会議 (口頭 86 件、ポスター 100 件) に対して、ポスター発表が無くなって規模は縮小したが、その分テーマが絞られて情報を把握しやすくなったともいえる。窒化物半導体 LED の高性能化に関する発表が多く、非極性/半極性面 LED 関係と光取出し効率の向上技術に関するものが全体の約 1/4 を占めた。また、紫外線 LED、ZnO 系材料も発表件数が多かった。他にも、新構造の白色 LED、結晶成長と材料評価、ZnO や GaN のナノ結晶などに関する報告がなされた。

2. 主な話題とトピックス

2. 1 非極性/半極性面 LED

プレナリートークでは、UCSB の中村教授が c 面上の LED、非極性/半極性面の GaN 基板を用いた LED と LD の最近の研究成果、Ammonothermal 法によるバルク GaN の成長に関する研究成果を報告した。

c 面上の青色 LED (波長 445nm) は駆動電流 20mA で 38.4mW の光出力 (外部量子効率: EQE=69%) が得られ、青色までは c 面基板上で高効率化が可能であることが確認された。白色 LED でも 150lm/W (電圧 3.8V) と高い効率が報告された。非極性/半極性 LED は、青紫から緑色域にかけての効率改善が進み、緑色 LED では 20mA で 9.0mW (EQE=18.9%) の高出力が得られていた。m面 GaN 基板は三菱化学製で、バルク結晶から切り出しているため寸法が約 5mm x 10mm と小さいことが量産における課題であるとした。

東北大、筑波大、ロームのグループも三菱化学製の m面 GaN 基板を用いた GaN の成長と LED の評価を報告した。MOCVD 法で m面 GaN 基板上に成長した GaN 膜は貫通転位密度が $5 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 以下で積層欠陥密度も

ほとんど無い高品質な結晶が得られた。青色LEDの電流注入に伴うピーク波長のブルーシフトもc面LEDの60nm比べ、m面LEDでは12nmと小さく、ピエゾ効果の抑制が確認された（講演：G1）。

その他にもa面やm面GaNの成長や光学特性評価に関する多くの報告があり、非極性／半極性基板への関心の高さが伺われた。緑色LEDの高性能化に向けて、高品質で低価格なm面GaN基板の開発が待たれる。

2. 2 光取出し効率の向上

多くの機関からナノ構造によるLEDの光取出し効率の向上に関する報告があった。LGはサファイア基板の上にLEDを成長した後レーザリフトオフで基板から剥離し、そのn型GaN面にフォトリソグラフィでフォトリソグラフィック結晶（PC）パターンを形成し、nサイドアップでマウントすることで76%の光出力向上を報告した（講演：A1）。また、USCB（講演：A2）や台湾国立大（講演：A3）もPC構造によるLEDの光取出し効率の向上を報告した。他にも光取出し効率の改善技術として、Future ChipからのTiO₂とSiO₂の同時スパッタ法で形成したグレーデッド屈折率マイクロピラー（講演：B5）、UCSBからのLEDを空中に保持する球状パッケージ（講演：B7）、サファイア基板やGaN層のナノ／マイクロパターンニング（講演：C1、C2、C3）など様々な手法が提案された。光取出し効率の向上はLEDの外部量子効率を向上させる有効な手法であり、高い関心を集めているテーマの一つであろう。

2. 3 LED 外部量子効率のドループ現象

GaN系LEDでは、電流密度の増加に伴う効率の低下（ドループ）が問題であり、最近ではオージェ過程の寄与が論じられるなど関心が高まっていた。West Virginia大とLumei OptoelectronicsのグループはUV、青色、緑色LEDの波長シフトや量子効率を広い電流域で評価し、青～緑色LEDのドループは局在準位からの電流オーバーフローが有力な原因であると説明した（講演：H1）。台湾国立大は量子井戸幅の広いLEDでは効率が低下せず、井戸幅の狭いLEDでは顕著に効率が低下することを実験的とシミュレーションで評価し、リーク電流がドループの有力な原因であるとした（講演：H2）。Rensselaer Polytechnic Instituteらのグループは、貫通転位がピーク効率の低下をもたらし、歪による分極電荷が量子井戸からのリークを増大させてドループの原因となると報告した（講演：H3）。LEDの高出力化に向けて、ピーク効率を落とさずにドループを抑制する素子構造の最適化が必要となってきた。

2. 4 白色LED

高効率で演色性に優れた白色LEDを実現する方法として蛍光体フリーのLED構造が報告された。Chung Hsing大は、青色と緑色のLEDとAlGaInPエピタキシャル膜を赤色蛍光体とする白色LED構造を提案し、NTSC比96.4%という値を報告した（講演：B2）。Central Florida大とInflect SemiconductorのグループはレーザドーピングでCrやNをドーピングしたSiC基板のDAP発光を蛍光源とする白色LEDで演色評価係数85～97%、色温度2000～9500Kの制御性を示した（講演：B3）。

2. 5 紫外線LED

理化学研究所のグループは247～273nmの深紫外線LEDにおいてmWレベルのCW出力を報告した。サファイア基板上に高品質AlNバッファ層と2段階成長技術によって、貫通転位密度が $7 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ まで低減し、短波長紫外線LEDの外部量子効率（EQE）は、282nm(CW、9.8mW)で1.2%、250nm(CW)で0.43%と着実

に性能が向上した。紫外線LEDの室温における波長と光出力の関係は、CW動作では、273nmで 3.2mW、253nmで 2.4mW、247nmで 1.0mWであり、パルス動作では、227nmで 0.15mW (EQE=0.2%)、222nmで 14 μ W (EQE=0.003%)であった。短波長化に伴って、著しく効率が低下することがわかる。

Sensor Electronic Technology は、大きなバンドオフセットと狭い井戸幅の量子井戸を用いてピエゾ効果を抑制し、波長 285nm で内部量子効率 60%を報告した。このデバイスの外部量子効率は 3%であり、シミュレーションにより、光取り出し効率が約 6%と低いためと報告した(K5)。

280nm 帯の深紫外 LED は貫通転位密度の低減により結晶性が向上し、内部量子効率の向上が目覚しい。さらに光取り出し効率には改善余地が大きく残っていることから、今後も更なる高出力化が期待される。

2. 6 ZnO-LED

ロームからZnO基板上へのMBE法によるZnO膜のホモエピタキシャル成長が報告され、フォトルミネッセンスの量子効率と蛍光寿命に相関があることが示された。また、高温成長によってZnO膜の構造欠陥や点欠陥が減少することが確認された。ZnO基板上にNドープ p型MgZnO (キャリア濃度は 10^{16}cm^{-3} 程度と推定)を成長したヘテロ構造LEDも試作された (講演: M1)。

ZnO系LEDはまだ実用化の可能性を探る段階であり、水熱合成法で成長した高品質なZnO基板が入手可能となってきたことから、高濃度低抵抗p型ドーピング技術の確立がデバイス化の焦点であろう。

2. 7 その他のトピックス

東北大は、CrNバッファ層をウェットエッチングしてGaN膜をリフトオフする技術を報告した。CrN膜上には高品質なGaNが成長可能で、2インチ全面のリフトオフも可能である。この方法で作製した縦型LEDの直列抵抗は 0.65Ω と低く、金属基板を用いると 3.7V で 1.12A の大電流駆動時でも光出力の顕著な飽和が見られなかった (講演: B1)。Resselaer Polytechnic Institute も GaN 基板は熱抵抗が低く、接合温度の上昇が抑制されることから高出力LEDに適するというデータを示した (講演: I2)。

千葉大は1分子層のInNを活性層とするLEDを試作し、ピエゾ効果の影響が無く $700\text{A}/\text{cm}^2$ の高電流注入時のブルーシフトは 3nm以下であることを報告した。光励起によるレーザ発振も確認された (講演: D1)。

ナノ結晶に関する発表も多く、ZnO、GaN 合わせて全体の1割を占めた。上智大はTiマスクを用いたMBE法によるGaNの選択成長技術を用い、GaNナノウォールや規則配列GaNナノコラムを報告した (講演 O1、O3)。台湾国立大と Sandia National Lab の2グループは、GaNナノコラム (ナノワイヤ) をテンプレートにして、高品質なGaN膜を成長する技術の可能性を示した。

3. おわりに

本稿ではISSLEDでのいくつかのトピックスを紹介した。省エネルギーへの関心の高まりとともに半導体光源の重要性とその高効率化への要求と期待が高まっている。当面の課題は、グリーンギャップと言われる緑色域でのLEDの発光効率の不足であり、本会議でも非極性/半極性基板や光取り出し効率の改善などの技術が報告されたが、更なる技術革新が必要であろう。本研究分野が環境問題の改善に対する回答を提示できることを期待したい。紫外線LEDでは光取り出し効率の改善により出力向上が期待できよう。ZnOやナノ結晶は、次世代光デバイス材料として様々なアプローチからの研究が行われ、今後も活性化していくとの印象を受けた。なお、今回のISSLEDは2010年に中国の北京で開催される予定である。