

IWN2006 速報

成川幸男（日亜化学工業）

会議名：Internal Workshop on Nitride Semiconductors 2006

開催期間：2006年10月22日－27日

開催場所：京都国際会議場・京都大学桂キャンパス・立命館大学草津キャンパス

*****要 約*****
第4回のIWNが京都で開催された。大きくは窒化物半導体の結晶成長・光学特性評価・光デバイス・電子デバイスにわかれて様々な報告がなされた。LDでは、485nm-CW発振、450nmでの700mWという高出力青色LDの報告があった。白色LEDでは138 lm/Wという蛍光灯の1.5倍以上もの効率を有する白色LEDが報告された。GaNバルク結晶では、 10^4cm^{-3} 台の低転位でかつ2inchと大型の基板が報告された。半極性面上の結晶成長・デバイス特性に関する報告もあった。このように、基礎的なことから応用的なことまで幅広く成果が報告された会議であった。

1. はじめに

IWNは、日・欧・米の順で持ち回りにより隔年で開催されており、今回で4回目の開催が京都であった。メインの会場は京都議定書締結で有名になった京都国際会議場であった。また、個別テーマごとのランプセッションのような議論形式のセッションが5日目に京都大学桂キャンパスと立命館大学草津キャンパスに分かれて開催されて、白熱した議論が交わされた。参加者は総勢784名で、その内訳は日本が436名、米が72名、韓国が67名、台湾が57名、ドイツが49名、フランスが15名、ポーランドが13名、イギリスが7名、とその他であった。また、参加国は38ヶ国にもものぼり、過去最高であった。参加者としては、近年やはり韓国・台湾勢の非常に多くなってきている。

テーマとしては、LED、LD、HEMTといったデバイスと、バルク結晶、InN、無極性面成長、半極性面成長といった結晶成長、およびそれらのエピの光物性・構造解析評価があった。

2. 発光素子

2. 1 可視光LED

(論文番号: Mo0) Lumiledsからの150 lm/Wを目指した発表があった。Luxeonのパッケージング等のhigh power用途での高効率化に向けての課題や一般照明に応用するためのコスト等に関する報告であった。150 lm/Wが達成できれば一般照明の市場にも初期コスト、ランニングコストを含めて他の既存のランプに対抗できると試算していた。しかし、作製したパワー白色LEDの発光効率は、80 lm/W前後であり、目標とは大きな隔たりがあった。現状一番の問題は放熱と発光効率の向上であるようだ。発光効率の改善の手法としては、Thin-GaNのFlip-Chip実装によって、光取り出し効率を80%以上に上げることが可能であると報告していた。また、近年の白色LEDの伸び率を考慮すれば、いずれ150 lm/Wに到達するであろう予測していた。また、RGBのLEDの組み合わせに関しても述べていたが、特にGreen LEDの効率が問題で、

よほどの **break through** が無いと無理で、Blue+蛍光体が本命と発表していた。

(論文番号: Tu1-1) 日亜化学からは、p 電極に ITO を用い、基板に凹凸加工を施したサファイア基板を用いることで、光取り出し効率を大幅に向上できるという報告があった。240×420 μm^2 の小チップでは、20mA 駆動時、出力 35.0mW、外部量子効率 63.3%の高効率青色 LED が作製されており、それを用いた白色 LED では 138 lm/W という蛍光灯の 1.5 倍もの高効率は白色 LED が報告された。また、1×1 mm^2 の大チップでは、350mA 駆動時、出力 458mW、外部量子効率 47.2%の高出力青色 LED が作製されていた。2A 駆動時では、光出力は 1.9W に到達していた。また、このチップを用いた白色 LED は、350mA 駆動時、光束 106 lm, 発光効率 92 lm/W であった。1W クラスの LED でも 100 lm/W にかかなり近づいてきた。さらに複数のチップを 1つのパッケージに実装することで、700mA 駆動時 500lm の光束を得ており、40W 級白熱灯の全光束と同等になっていた。また、複数の蛍光体を用いることで、演色評価指数のほぼすべてを 100 近くまで高められ、平均演色指数は 97 であった。このように、白色 LED の発光効率・演色性は蛍光灯を凌駕し、光束は中型白熱球に匹敵するまでになったと報告していた。

2. 2 UV-LED

(論文番号: Tu-LN2) NTT のグループからの AlN を発光層に用いた 210 nm の Deep-UV の LED に関する報告があった。今回は、n 型の AlN が高抵抗なことから、横方向からの電流注入をやめて、SiC 基板の裏側から n 電極をとっていた。それにより 20mA での Vf が 35V から 17V まで低減できていた。n 型の AlN の室温でのキャリア密度は $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 程度が Hall 測定で得られていて、Si 濃度は 3×10^{17} 程度であった。ただ、実際作製したデバイスでは、 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の Si をドーピングしていたので実際のデバイスのキャリア密度は不明である。p 型のキャリア密度は 10^{10}cm^{-3} で室温ではほとんど絶縁物である。また、水曜日にも同じ発表者から AlN LED の偏光特性に関する報告がなされており、AlN は、バンド構造から、電界の方向が c 軸に平行な偏光を持った発光が主になるために通常の c 面上の LED では表面方向の発光成分が少なくなるために光の取り出し効率が悪いことが報告されていた。この点からも AlN を用いた LED では、a 面か m 面が有利であるとのことである。

(論文番号: Mo1-2) Sensor Electronic Technology から 280 nm の UV LED についての発表があった。AlGaN 組成 75%で n 型のキャリア濃度 10^{18} 乗台、移動度 $40 \text{cm}^2/\text{Vs}$ を達成していた。また、280 nm での光出力が 2 mW と他の波長に比べて倍ぐらい高かった。280 nm よりも長い波長の LED よりも光出力が高かったので、280nm より長波では成長条件の最適化等でもっと出力が出せるポテンシャルがあると思われる。

2. 3 フォトニクスクリスタル

(論文番号: Tu1-3) UCSB から、フォトニッククリスタルを用いて **guide mode** の閉じこめられた光を **diffraction** で縦方向に取り出すという報告があった。LED は LD と異なり成長方向の光閉じこめ層が無いために **guide mode** は基板-エピ界面とエピ-空気界面の間に閉じこめられることになる。エピ層の厚みは数 μm あるために **guide mode** は多数の多次モードからなることになる。そのためにフォトニッククリスタルと **guide mode** のカップリング効率は悪くなってしまう。そこで、活性層の下に屈折率の小さな層を入れる

ことにより光の閉じこめ効率を上げて、基本モードの伝搬を増加させることにより、フォトニッククリスタルと **guide mode** のカップリング効率を上げていた。結果としてフォトニッククリスタルがない場合に比べて出力はあがっていた。フォトニッククリスタルでなくランダムに表面を荒らしただけの構造と比べてどれぐらいの効果があるのか質問されていたが実験していないとのことである。フォトニッククリスタルにしないと出力があがらないのか、光の散乱源を入れるだけで効率が上がるのかが今後の課題と思われる。

(論文番号: Tu-LN3) 東大から **Quantum dot** とフォトニッククリスタルの組み合わせによる **Single Photon Emitter** に向けての研究について報告がなされた。EB と RIE の組み合わせで AlN を削ることによりフォトニッククリスタルを作製していた。また、成長方向の光閉じこめのために SiC と AlN 界面を **photoelectrochemical etching** により **lift-off** していた。**lift-off** された部分は歪みのために自然に凸レンズ上になっていた。得られたフォトニッククリスタルは **Q factor** が 2,400 と高い閉じこめを実現していた。加工ダメージの低減や EB 以外のパターンニングのが今後の課題とのことである。ただ、**QD** との組み合わせだと活性層内では面内方向に閉じこめがおきるので表面のダメージがあまり影響しない可能性もある。

2. 4 LD

(論文番号: Mo1-5) サムソンから長波長 LD について報告がなされた。**SQW** あるいは **2QWs** を活性層に用いて InGa_{0.5}N/GaN₂ 層からなる光ガイド層を有する構造を用いていた。447nm の青色 LD は、110mW の光出力時、**I_{op}**=159mA, **V_{op}**=5.4, **WPE**=11.6%, 寿命 1000h であった。**COD level** は約 300mW であり、キックは 150mW まで見られないと報告していた。また、485nm の青緑色 LD の CW 発振にも成功していた。ミラーは **R_f**=97%, **R_r**=99% とかなり高いものを用いており、無理矢理発振させている感じであった。当然 η はかなり小さかった。

(論文番号: Mo1-6) ソニーから高出力の青色 LD について報告がなされた。活性層を InGa_{0.5}N/InGa_{0.5}N の MQW から InGa_{0.5}N/InAlGa_{0.5}N/AlGa_{0.5}N の MQW に変更し、基板に転位密度 $7.5 \times 10^5 \text{cm}^{-2}$ というかなり低転位密度の GaN 基板を用いることで、活性層成長時に発生する貫通転位を低減できると報告していた。その結果、リッジ幅: 12 μm 、キャビティ長: 2mm の高出力 LD(440-450nm)で 750mW の出力を得ていた。そのときの電流値は 1.3A で、電圧は 4.6V であった。また、ACA によるライフ試験結果から、寿命は 10000 時間と見積もっていた。ただ、質疑応答で普通は ACP で評価するのに何故 ACA なのかと質問されていたが、返答できていなかった。

3. 結晶成長

3. 1 GaN バルク結晶

(論文番号: Tu3-1) 東北大学を中心として東京電波などの企業との共同研究による、**amothermal** 法を用いた Bulk GaN の成長に関する報告があった。結果としては、まだあまり良い結晶も大きな結晶も得られていない。成長レートはかなり遅いが、水晶の成長と同じで種をたくさん挿入して、待つだけなので大きな autoclave を作製すればコストは安くなるとのことである。大型の autoclave の準備を進めているようだったが、肝心の結晶があまり良いものが得られていない上に、単純に容器を大きくしても成長が持続して行われるかもわからないので、実際に大型の結晶を得るにはまだだいぶハードルがあるという印象である。

(論文番号 Tu3-2) ポーランドの Porowski らのグループらによる高压合成法と HVPE の組み合わせによる Bulk GaN の成長に関する報告。種結晶は高压合成法によって得られた針状の GaN。その針の側面(10-10) 状に HVPE により GaN を成長させることにより結晶の大型化を試みていた。種結晶は黒かったが、HVPE により成長したものは透明であった。ただし、HVPE を繰り返すと HVPE 間の界面が顕微鏡で観測されて界面部分はキャリア濃度が上がっているとのことである。キャリア密度は通常の部分で $3\text{-}5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 程度とこの面に成長するとキャリア濃度が高くなるそうである。1 cm 以上の結晶が得られていたが、現有の装置ではこれが限界なので、今、改造しているとのことだった。

(論文番号 : Tu3-3) 大阪大学から Na flux 法を用いた 2 inch Bulk GaN の報告。報告では HVPE で成長した Free standing 2 inch GaN 基板上に LPE 成長していた。また、MOCVD で成長したサファイア付きの GaN をテンプレートとした成長にも成功していて、このサンプルは実際会場で見せていた。テンプレートからはみ出た部分、つまり成長方向が c 方向以外の部分の結晶は黒かったが、テンプレート上の部分は透明であった。成長した Bulk 結晶の厚みが 2 mm ぐらいあるので、冷却過程でサファイア基板は割れていた。転位密度は 10^4 cm^{-2} ぐらいとのことである。SIMS の結果から結晶中に Na はほとんど含まれていないとのことであった。

3. 2 AlN バルク結晶

(論文番号 : Tu3-4) Crystal IS から昇華法による 2inch のバルク AlN に関する報告があった。2inch の AlN 基板が boules 上の結晶から切り出されていた。転位密度は AlN 基板が 10^3 cm^{-2} であった。しかし、この上に AlN を成長させると 10^4 cm^{-2} に増加していた。基板の表面処理の問題というように説明していたが、断面 TEM 写真がなかったので、成長表面で新たに転位が発生したのか、AlN 基板中にバーガーズベクトルの大きな転位があって、それが分裂したのかはわからない。GaN を成長すると 10^5 cm^{-2} に増加していた。これは、格子定数差により発生したと思われる。

(論文番号 : TuP1-21) 住友電工からの昇華法で作製した AlN 基板の発表があった。住友電工からの AlN 基板の発表は初めてであった。見た限りは通常の昇華法で作製しているようだった。種結晶は 1 inch より少し大きな SiC を使っていてそこから切り出して 1 inch を取り出しているとのこと。種結晶から結晶が太っていくような横方向の成長は少ないとのことだった。転位密度に関しては 10^5 cm^{-2} 台が得られていた。Crystal IS よりは今のところまだ転位がだいぶ多いようである。

3. 3 無極性面・半極性面成長

(論文番号 : Mo3-1) Paul Drude Institute から各種基板上に成長した a-plane, m-plane GaN の歪みに対する光遷移エネルギーと偏光特性に関する報告があった。特に SiC 上の GaN では逆格子マッピングから面内の歪みが正確に出せるので光学特性と合わせて、GaN の deformation potential を正確に決めることができる。InGaN や AlGaIn ではどうなるかと質問があったが、GaN に対しては正確に求まっても混晶となると物性定数が異なる上に組成依存がでることや面内不均一あるため測定が困難なことから実際のデバイスでの特性を予知することは難しい。

(論文番号: Mo3-2) UCSB のグループからの Spinel および sapphire 上の semipolar GaN の成長に関する報告があった。結晶の対称性から、Spinel(100)、(110)上は、4 個と 2 個 sapphire(10-10)上は、GaN(101-3)が 2 個、(11-22)が 1 個の等価な方位が存在する。そのために、ジャストの基板ではこれらの選択ができないために異なる結晶方位からなる複数のドメインが存在することになる。オフ角のついた基板上に成長することで 1 個のドメインで成長することを試みていた。90%以上の 1 個のドメインの結晶ができていたが完全な選択制は得られていなかった。また、SEM で観察された結晶のモフォロジーもドメインの結晶方位を反映したような結果となっていた。

(論文番号: Mo3-4) 名城大学から a-plane GaN on r-plane Sapphire と m-plane GaN on m-plane 4H-SiC の lateralGrowth の報告があった。方法は UCSB が従来から報告している方法と同じで、ストライプ状のマスクの下にだけ GaN を残すことにより、最初 lateral 成長で GaN の seed をつなげて、つながった後、縦方向の成長をさせて、マスクよりも GaN が十分に高く縦方向に伸びた後、再び横方向の成長をさせるというもの。この結果、1 度の成長で 2 段階の lateral Growth ができて、積層欠陥と貫通転位が大幅に減らせる。UCSB からの報告では Ga-face の成長が速く結晶性も良いということだったが、名城大学からの報告では N-face の方が速いということで原因はよくわからなかった。

(論文番号: WeOD3-1) 京大からの semipolar GaN の成長と LED 特性に関する報告があった。最後に日亜化学が作製した semipolar LED の偏光特性に関しての報告があった。semipolar LED で、室温で大きな偏光依存が観測されていた。スペクトルの変化から 40-50 meV ぐらいのエネルギー差が top と second の valence band の間にあると思われる。偏光特性に関しては、もう少し InGaN 系量子井戸での実験結果が多く報告されないと理論予想は難しいと思われる。ただ、semipolar, nonpolar LED で得られている偏光度は 90%ぐらいなので LED のバックライトで偏光フィルターを除くにはコントラストが低いと思われる。

4. 光物性・構造解析評価

4. 1 表面プラズモンによる内部量子効率の改善

(論文番号: Tu1-4) カルテックからの表面プラズモンを用いた LED の内部量子効率の向上。活性層中の励起子を surface plasmon とカップリングさせることにより、通常の輻射再結合とは異なる過程を経ての発光を観測していた。発光強度の向上と時間分解 PL による発光寿命の減少を観測していて surface plasmon の効果であると説明していた。また、発光強度の向上は、活性層と金属との距離に対して指数関数で減少していることも根拠としていた。ただ、やはり、デバイスを考えて場合、活性層から数十 nm 以内の表面に金属をつけるということは pn 接合を作るのがほとんど不可能になるためにその点を質問されていた。今のところアイデアは無いようだ。金属がナノ構造を持っているために、その構造に起因する diffraction で発光の空間的なパターンが変わって発光強度が上がっているのではないかと質問されていたが、TRPL による発光寿命の縮小と発光強度向上の膜厚依存性からその可能性はなく、surface plasmon は観測されているようだ。

4. 2 SNOM 測定

(論文番号: Tu1-5) 京都大学からの SNOM を使った転位と非発光センターとの関係について報告があった。

発光波長が 400 nm 付近の試料では、AFM で観測されたらせん転位と混合転位に対して SNOM で観測される暗点は相関があった。しかし、470 nm 付近の試料では相関は見られなかった。Illumination-Collection Mode と Illumination Mode との比較から、localization によるキャリアの diffusion length の違いで説明していたが、Illumination-Collection Mode で観測されていたスペクトルが Illumination Mode で観測されていないというおかしな現象が見られていたのでデータの解釈に曖昧な点が残る。今後、原因を検討することである。

4. 3 自然分極

(論文番号: Tu1-6) Technical University of Braunschweig から電子線照射によるスペクトルの変化を表面電荷で遮蔽されていた自発分極が観測されるようになるためであると結論づけている報告があった。電子線照射によってスペクトルが Blue Shift することに対して、Hangleiter らは表面電荷が電子線照射により取り除かれるためであるとしている。また、このスペクトルの Blue Shift は空気中のアニールをすることにより元にもどるとのことである。N₂ 雰囲気では効果がないとのことであった。また、タイトルは Quantitative determination となっているが実際は自発分極の何%が観測されるようになっているかがわからないので、定量的に自発分極の大きさがわかるというわけでは無いようである。

4. 3 刃状転位

(論文番号: WeOP2-5) University Regensburg からの μ -PL による刃状転位のバーガーズベクトルの決定ができるという報告があった。刃状転位が存在すると、1 層多く挿入された部分は圧縮歪みを、1 層少ない部分は引っ張り歪みをうける。そのため、低温で PL を行うと刃状転位の周りの(D₀X)の発光のシフトが観測される。よって、(D₀X)の発光ピークをマッピングすることにより刃状転位のバーガーズベクトルの方向を決定していた。 μ -PL で刃状転位を観測するには、空間分解能から転位密度を 6 乗台に減らす必要があるので HVPE による高品質の GaN が必要とのことである。

5. おわりに

蛍光灯の 1.5 倍以上の効率をもつ白色 LED が開発され、まだまだ白色 LED の効率は向上していこう。GaN バルク結晶も 10⁴cm⁻³ 台の低転位でかつ大型の基板も開発され、今後の LD あるいは LED への応用が期待される。

また、窒化物半導体の研究開発は成熟期に達した感があるが、今回の IWN では発表件数も参加人数も参加国数も増加しており、窒化物半導体の研究開発の領域がまだまだ拡大していると感じた。特に、韓国・台湾勢のこの分野への勢いがよりいっそう強くなっていると感じた。