

高出力非極性m面GaN-LED

High-Power Non-Polar m-Plane GaN-LED

横川 俊哉
Toshiya Yokogawa

加藤 亮
Ryo Kato

井上 彰
Akira Inoue

山田 篤志
Atsushi Yamada

要 旨

エネルギー使用量の削減や環境負荷低減が世の中の潮流となるなか、省エネで長寿命であるLED (Light Emitting Diode) 照明機器の普及が急速に進展しつつある。この要望にこたえるべく、当社はその基幹部品である高効率、高出力LEDの開発を行っている。独自の高品質m面InGaN結晶成長技術と低抵抗電極技術を駆使して、1 Aで1.23 Wを示す高出力LEDを実現した。c面のLEDでの顕著なドロップによる効率低下は、m面GaN-LEDでは抑えられ、駆動電流密度500 A/cm²においても外部量子効率の低下は約20%にとどまり、低ドロップ特性を実現した。

Abstract

Growing demands for reduction of energy consumption and environmental impact are rapidly leading to the spread of solid-state Light Emitting Diode (LED) lighting with low power consumption and high reliability. To meet these demands, we are developing high-efficiency, high power LEDs. High optical output power of 1.23 W at 1 A was obtained by using new technologies: epitaxial growth of high-quality m-plane InGaN and low-contact-resistance electrode. The m-plane GaN-LED realized a quite small external-efficiency droop of about 20% up to 500 A/cm², while remarkably large droop occurs in polar c-plane (0001) GaN LEDs.

1. はじめに

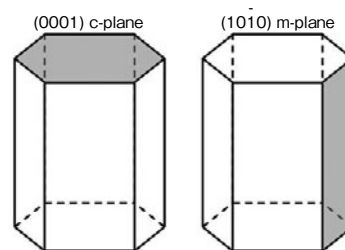
高い省エネ性能や長寿命を有するLED照明機器の普及は急速に進みつつあり、従来の白熱電球、蛍光灯、HID (High Intensity Discharge) ランプからLEDへの置き換えが進むことで、白色LEDの国内市場予測では2015年には約1兆円の規模にまで成長すると期待されている。一般に白色LEDは、青色LEDチップと蛍光体との組み合わせによって実現されており、この青色LEDには窒化ガリウム (GaN) 系化合物半導体を用いられる。近年、LED照明の高輝度化の要請によりこのGaN-LEDの高効率化、高出力化が強く求められている。

GaN系半導体はウルツ鉱型の結晶構造を有しており(第1図)、LEDは(0001) c面を結晶成長面として用いるのが一般的である。しかしLEDの発光部を構成するInGaN層をc面方向に成長すると、ピエゾ分極に起因した量子閉じ込めシュタルク効果によって発光効率が低下することが課題となる[1]。この量子閉じ込めシュタルク効果の影響を抑えるには、InGaN層を3 nm未満の薄膜にするのが効果的であり[2]、この方法で75.5%の外部量子効率が報告されており、これは現在開発品c面LEDの最高値となっている[3]。しかし高効率を維持できるのは低電流密度(2 A/cm²)のみであり、駆動電流密度が増加すると、効率は急激に低下する現象(ドロップ)を示す[3]。これはInGaN井戸層の膜厚が3 nm未満という薄い構造であるために、大電流密度で駆動するとキャリア

が発光部のInGaN層からあふれ出たり、Auger過程が生じてしまうためと考えられている[4]。c面LEDでは、特に高輝度LED照明への用途に必要な、大電流密度で高効率を得るのに課題があった。

筆者らは、このc面での課題を解決するため、非極性面である(10-10) m面を成長面として着目し、量子閉じ込めシュタルク効果が発生しないLEDの開発を行ってきた。そして高輝度LED照明に有用な大電流密度で高効率の特性を実現した。非極性面は分極が発生しないためにInGaN層を厚くすることが可能になり、大電流密度での駆動で高効率を実現した。従来のc面の10倍以上となる500 A/cm²を上回る大電流密度まで効率の低下が小さいLEDの開発に成功した。

本稿では非極性面であるm面GaN-LEDの開発において特に重要な技術となった、i) 高品質InGaN結晶成長技術、ii) 低抵抗p型電極技術の2つの取り組みについて触れ、



第1図 GaN系半導体のウルツ鉱構造

Fig. 1 Wurtzite structure of GaN-based semiconductor

iii) 当社LEDの最新の性能（高出力LED特性）について説明する。

2. m面Ga₂Nの要素技術

2.1 高品質InGa₂N結晶成長技術

m面InGa₂N層の結晶成長が従来のc面InGa₂N層の結晶成長と最も大きく異なる点は、In原子が結晶内部へ取り込まれにくいことにある。これにより所望の発光波長を得ることが困難であった。

m面でIn組成を高めつつ、高品質な結晶を得るための有効な成長パラメータを見だし、最適化するため、m面の原子ステップの構造に基づいて考察を行った。その結果、m面ではステップ位置における窒素原子の安定性を高めることがInの固化に重要であることが明らかとなった。

第2図に、m面の代表的な原子ステップの構造を示す。(a)は模式断面図であり、(b)はその上面からの模式図である。第2図(a)中にある破線は概念的なステップを表し、第2図(b)では、ステップの下段側表面に属する原子は示していない。なお、InGa₂N層の最表面を断面TEM (Transmission Electron Microscope) で観察すると単原子層高さのステップがほぼ等間隔に存在する様子を確かめたため、InGa₂N層の結晶成長はステップフロー成長[5]で進行すると考えられる。

GaN系半導体を成長する場合、III族原子とV族原子の供給流量比であるV/III比を少なくとも1000以上に設定するため、V族原子である窒素原子はIII族原子 (Ga, In) に比べて十分多量に存在する。そのため成長するGaN系半導体の結晶表面において、窒素原子は頻りにIII族原子との結合および離脱を繰り返す。このような考えで、第

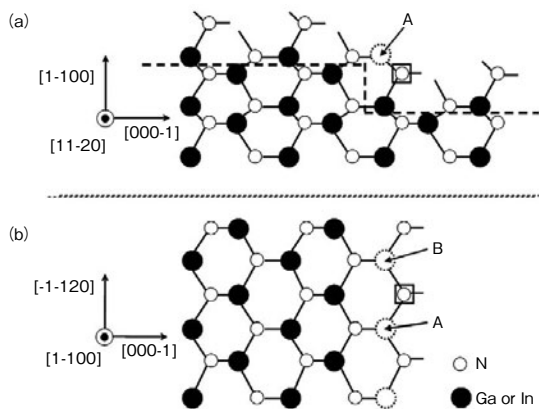
2図に示すm面の原子ステップ構造に注目すると、ステップ位置であるA点においてIn原子が効率よく固化するためには、供給されるIn原子数を増やすよりも、A点のIII族原子とボンドを結合する位置の窒素原子（四角囲い）が安定にその場にとどまり、離脱しにくい状態にあることが望ましいと考えられる。

以上のようにm面とc面でIn原子の取り込みに差のあることが、ステップ位置における窒素原子の安定性が異なることに起因しているとの考察から、m面のステップ位置における窒素原子の安定性を高める成長パラメータとしてV族原料 (NH₃) の供給モル量に着目した。そして従来のc面成長とは異なる条件に、このパラメータを最適化することにより、高品質InGa₂N結晶を得ることが可能となった。具体的なモル量など条件は成長装置に依存するため本稿では詳述しない。10 Kにおけるフォトルミネッセンス発光の励起光強度依存性を測定し、次に室温における励起光強度依存性を測定し、それぞれの最大積分強度の比を求めることによって室温における内部量子効率を求めた。この結果、波長405 nmにおいて内部量子効率は87%という高い値を得ることを実現した。

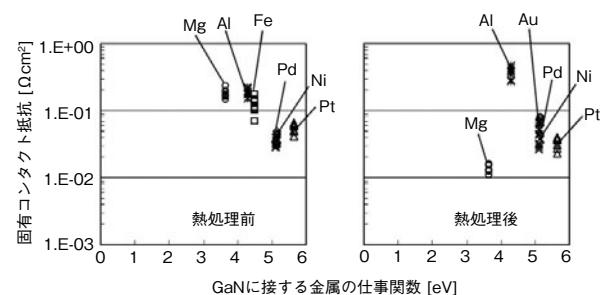
2.2 低抵抗p型電極技術

m面Ga₂Nの仕事関数は7.0 eVであり[6]、これは従来のc面Ga₂Nの仕事関数4.5 eVよりもかなり大きい。また、これは単体金属で最も仕事関数の大きいPt (5.2 eV) をも上回る値である。このため、c面成長p型層ではオーミック接触となる典型的な金属、例えばNiやPdなどを電極として使用しても、m面p型層では、第3図に示すように熱処理を実施しても固有コンタクト抵抗が平均的に $5 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}^2$ 程度と極めて大きい値を示す。

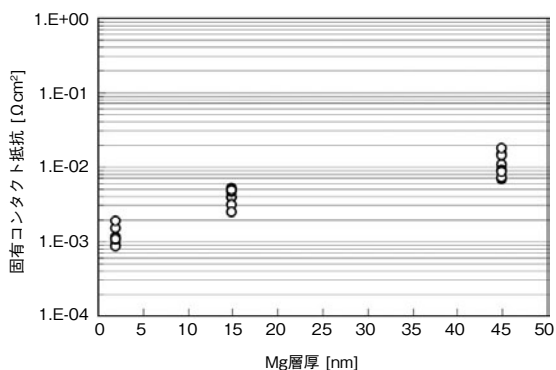
しかしm面p型Ga₂N層上にMgを電極とした場合、ショットキー特性が改善され、オーミック特性の傾向を示すことを初めて見いだした。さらに第4図に示すようにMg電極の厚みを最適化すると平均的な固有コンタクト抵抗は



第2図 m面の代表的な原子ステップ構造
Fig. 2 Atomic step structure of typical m-plane



第3図 各種電極の固有コンタクト抵抗
Fig. 3 Contact resistance of various metal



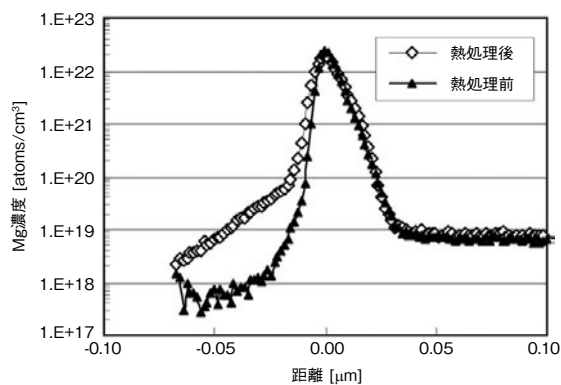
第4図 Mg電極の固有コンタクト抵抗の厚み依存性
Fig. 4 Thickness dependence of contact resistance of Mg electrode

$8 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ まで低減した。なお、興味深いことにc面ではMg電極を使用してもコンタクト抵抗は低減しなかった。

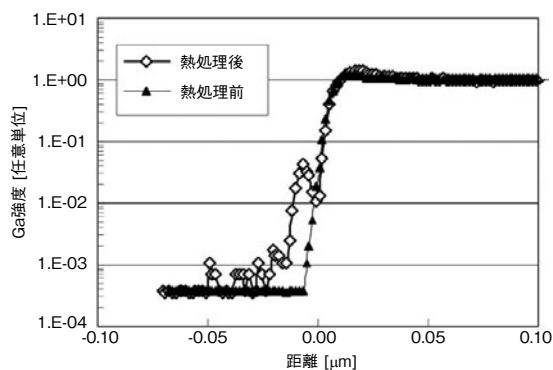
同じMg電極であってもm面とc面でコンタクト抵抗の特性が大きく異なった原因を調べるため、SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) 分析を実施して熱処理前後でのMg原子の分布の変化について調べた。第5図にその結果を示す。またGa原子およびN原子の分布の変化も同じように第6図、第7図に示す。

分析した電極には、p型GaN層に接触する金属として最適な膜厚のMgを、さらにその上部にMgの酸化を抑制するため保護金属として、十分な厚さのPtを使用している。横軸の距離0.0 μm はおよそ電極とp型GaN層の界面を示しており、マイナス側が電極、プラス側が半導体 (p型層) 内部にあたる。また、熱処理はすべて600 $^{\circ}\text{C}$ の温度で10分間、窒素雰囲気中に保持することで実施している。

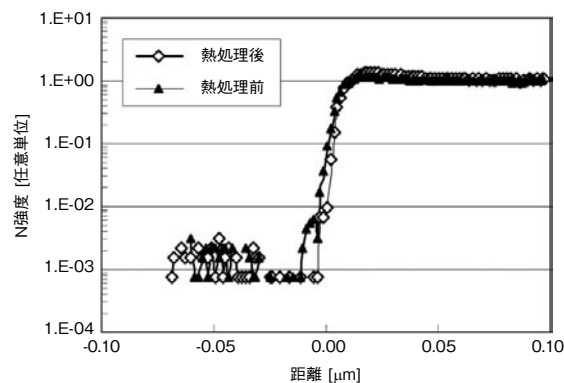
m面p型GaN層にMg電極を使用したとき、最もコンタ



第5図 熱処理前後のMg原子の分布の変化
Fig. 5 Profile change of Mg atoms before and after annealing



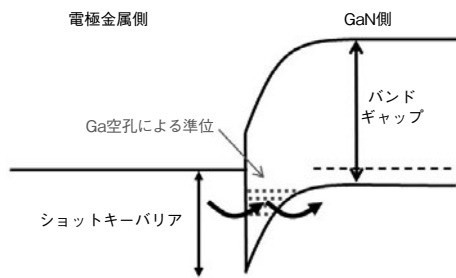
第6図 熱処理前後のGa原子の分布の変化
Fig. 6 Profile change of Ga atoms before and after annealing



第7図 熱処理前後のN原子の分布の変化
Fig. 7 Profile change of N atoms before and after annealing

クト抵抗が小さくなる熱処理の温度は600 $^{\circ}\text{C}$ 付近であるため、600 $^{\circ}\text{C}$ の熱処理前後でMg金属とp型GaN層との界面近傍においてMg原子の分布に大きな変化が生じることが当初予想された。しかし第5図によれば、熱処理前後で、Mg金属とp型GaN層との界面近傍では分布の変化は見られず、GaN内部へのMg原子の拡散は生じなかった。一方、熱処理後Mg原子はややPtには拡散するのが見られた。

しかし興味深いことに、第6図に示されたGa原子の分布から電極とp型GaN層の界面にごく近い領域において、Ga原子がMg電極側に拡散している様子が見られた。一方、第7図に示すN原子の分布を見ると、熱処理後においてN原子はほとんど拡散せず、分布はほとんど変化しなかった。したがってm面では600 $^{\circ}\text{C}$ 付近の熱処理を実施すると、Ga原子だけがMg電極側に拡散することが明らかとなった。これはp型層内にGa空孔が形成されていることを示す。Ga空孔はアクセプターとして機能するため、これが電極とp型GaN層の界面においてショット



第8図 Ga空孔によるコンタクト抵抗低減のモデル
Fig. 8 Reduction model for contact resistance by Ga vacancy

キー障壁をトンネルする準位を形成することで、仕事関数の小さいMgであってもコンタクト抵抗が低減すると考えられる(第8図)。

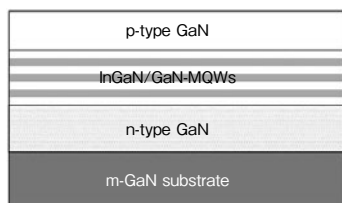
c面で同様に、熱処理前後のSIMS分析結果を見てみると、Ga原子だけでなく、N原子はMg電極側に、熱処理によって拡散し、プロファイルが変化することがわかった。すなわちアクセプターとして機能するGa空孔の形成だけでなく、ドナーとなるN空孔が形成されていることを示す。またc面の場合はMgもp型GaN層側へ熱処理によって拡散することがわかった。これらの現象が、m面とc面で異なるMg電極の効果を引き出す要因となっていると考えられる。

本来仕事関数の小さなMg電極であるにもかかわらず、m面p型GaNに対し低いコンタクト抵抗を示すことが明らかとなった。さらなる最適化によって現在、m面においてはMgにより従来よりも1桁以上小さな $2 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ 程度のコンタクト抵抗を得ることが可能となった。このメカニズムとして、m面GaNとMgとの接触において、GaN中にGa空孔が形成されるという特徴的な現象がかわっていることが明らかとなった。

3. 高出力LED特性

3.1 低ドループ特性

以上のような技術開発によって、高輝度LED照明に有用な大電流密度で高効率の特性をm面GaNで実現した。

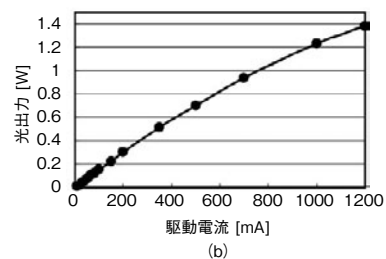
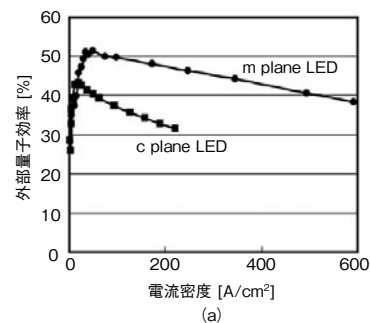


第9図 LED構造
Fig. 9 LED structure

その代表的な特性を紹介する。デバイス構造の概略は第9図に示す。m面GaN-LEDにおいては、ピエゾ分極による量子閉じ込めシュタルク効果がないため、井戸層を厚くしても効率低下しないことから、活性層はInGaN井戸層の厚みが15 nmで、3層からなる多重量子井戸構造とした。比較のためのc面GaN-LEDにおいては、ピエゾ分極の制約からInGaN井戸層の厚みが3 nmで、3層からなる多重量子井戸構造とした。In組成はm面もc面も10%とした。駆動電流密度と外部量子効率の関係を第10図(a)に、駆動電流と光出力の関係を第10図(b)にそれぞれ示す。第10図(a)には、c面GaN-LEDの評価結果も比較のために示している。

第10図(a)に示すように、m面GaN-LEDでは最大値で52%程度の外部量子効率を得られた。m面LEDで特徴的に、500 A/cm²以上の大電流密度においても効率の低下(ドループ)が小さい傾向が見られた。これに対してc面LEDは10 A/cm²の小さい駆動電流密度のときに効率が最大値に到達し、後は急激に低下した。

また、第10図(b)にも示されるように、1 Aで1.23 W以上の光出力が得られるなど、電流に対する光出力の線形性も極めて良好であった。このため高輝度照明への応用が期待される。また、大電流密度でも高効率を維持できるということは、チップ数が少なくても十分な光束を得られることを意味しており、c面GaN基板を用いたLEDと比較しコスト削減にも効果を有する。



第10図 m面GaN-LEDの特性
Fig. 10 Characteristics of m-plane GaN-LED

4. まとめ

LED照明機器の要望にこたえる高効率、高出力m面GaN-LEDの開発を行った。独自の高品質m面InGaN結晶成長技術と低抵抗電極技術を用いることで、1 Aで1.23 Wの高出力を実現した。またc面のLEDで顕著なドループによる効率低下は、m面GaN-LEDでは抑えられ、駆動電流密度500 A/cm²においても外部量子効率の低下は約20%にとどまる、低ドループを実現した。今後は、波長のさらなる長波長化と、ますます進むLED照明機器の高機能化、低コスト化に対応して、高効率、高出力化技術を開発し、商品化していく予定である。

参考文献

- [1] J. S. Im et al., "Reduction of oscillator strength due to piezoelectric fields in GaN/AlxGa12xN quantum wells," *Physical Review B*, vol.57, no.16, pp.R9435-R9438, 1998.
- [2] T. Kuroda et al., "Influence of free carrier screening on the luminescence energy shift and carrier lifetime of InGaN quantum wells," *Journal of Applied Physics*, vol.92, no.6, pp.3071-3074, 2002.
- [3] Y. Narukawa et al., "Improvement of luminous efficiency in white light emitting diodes by reducing a forward-bias voltage," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.46, no.40, pp.L963-L965, 2007.
- [4] Y. C. Shen et al., "Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence," *Applied Physics Letters*, vol.91, pp.141101-141103, 2007.
- [5] 上羽牧夫責任編集, "結晶成長のしくみを探る," 共立出版(株), 2002.
- [6] M. H. Tsai et al., "Electronic structures of polar and nonpolar GaN surfaces," *Material Science and Engineering B-SOLID State Materials For Advanced Technology*, vol.88, no.1, pp.40-46, 2002.

執筆者紹介



横川 俊哉 Toshiya Yokogawa
デバイス・システム開発センター
Advanced Devices Development Center
博士(工学)



加藤 亮 Ryo Kato
デバイス・システム開発センター
Advanced Devices Development Center
博士(理学)



井上 彰 Akira Inoue
デバイス・システム開発センター
Advanced Devices Development Center



山田 篤志 Atsushi Yamada
デバイス・システム開発センター
Advanced Devices Development Center