

# GaN ナノウォール光・電子デバイス

菊池 昭彦

## 1. 研究目的

### (b-1) ナノウォール：

窒化物半導体ナノウォール結晶は、幅数百 nm 以下の板状構造を有し、MBE 法による選択成長技術によって成長された新しいタイプのナノ結晶である。ナノウォールは横方向に延伸した連続体構造を有するため光導波路や電子デバイスへの適用が容易という特徴を有する。また、Ti マスクの開口形状に沿って選択的に成長するため、分岐構造やリング形状、メッシュ形状など自由な形状を構成でき、高度な機能性を有する様々なデバイスへの応用が期待される。本研究では、AlGaIn/GaN ヘテロ構造ナノウォール結晶を用いた電界効果トランジスタ (FET) 構造を試作し、電子デバイス応用の可能性を検討した。

### (b-2) 水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法による InGaIn/GaN ナノ構造：

窒化物半導体ナノ構造は、一般に結晶成長法かエッチング法で作製される。前者は、貫通転位フリー、コアシェル構造の形成、高 In 組成 InGaIn が成長可能等の優れた特徴を有するが、制御性や大面積化、コスト面に課題がある。一方、エッチング法は制御性や大面積化に優れるが、加工損傷による発光特性の劣化や毒性ガスの使用による安全性や設備コスト等に課題がある。本研究では、これらの課題を解決し得る窒化物半導体ナノ構造作製技術として、GaN の水素雰囲気中での熱分解反応を利用した水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法を提案し、そのエッチング特性やデバイス応用に関する基礎技術の確立を目指した。

### (b-3) 無機/有機ハイブリッド LED：

無機材料は優れた電気伝導性やバンドエンジニアリング性、耐環境性、高熱伝導性を有するが、緑色や黄色域の発光効率が低く、大面積化やフレキシブル化への適用が難しい。一方、有機材料は可視全域での高発光効率が期待され、大面積化やフレキシブル化に適しているが、水分や酸素により劣化しやすく、電気や熱導電性が低い等の短所を有する。本

研究では、このような無機半導体と有機半導体の長所を相乗的に活かし、短所を相補的に補うようなデバイスの開発を目的とし、無機半導体と有機半導体を組合せた無機/有機ハイブリッド発光デバイス (Inorganic/Organic Hybrid LED: IO-HyLED) 作製を行った。IO-HyLEDでは、無機半導体から有機発光層への電子注入効率が低いことから、新しい中間層技術を提案し、その有効性を検討した。また、窒化物ナノデバイスや IO-HyLED に適用可能な高性能透明導電膜の開発を目的として、誘電体/金属/誘電体 (DMD) 構造に着目し、紫外から可視域において高い透過率を実現できる MgZnO/Ag(Al)/MgZnO-DMD の作製とその熱処理効果に関する検討を行った。

## 2. 研究方法

### (b-1) GaN ナノウォール

#### b-1 GaN ナノウォール FET の作製と評価

rf-MBE 法による GaN 結晶の Ti マスク選択成長法において、ストライプ状の開口部を設けることにより板状のナノウォール結晶が得られる。この GaN ナノウォールは GaN ナノコラムと同じく貫通転位を含まない高品質結晶であり、優れた形状制御性を有する。ナノウォール結晶が面内に連続した構造を有することに着目し、電子デバイスへの応用可能性を検証した。AlGaIn/GaN ヘテロ構造ナノウォールをチャンネル領域に用いる電界効果トランジスタ (FET) 構造を試作し、初期特性を評価した<sup>\*b-i</sup>。

図 1 に、AlGaIn/GaN ナノウォール FET の作製プロセスの概要を示す。半絶縁性 c 面 GaN テンプレート表面に厚さ 5nm の Ti 膜を堆積し、電子線描画とドライエッチングでナノパターンを形成して GaN 層を露出させ、ノンドープ GaN ナノウォールを 3 時間成長した後、ノンドープ Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N を成長した。AlGaIn 層は選択成長性が低いため、ナノウォール側面や Ti

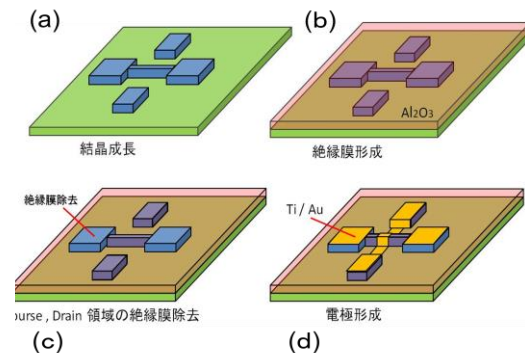


図 1. AlGaIn/GaN ナノウォール FET の作製プロセス

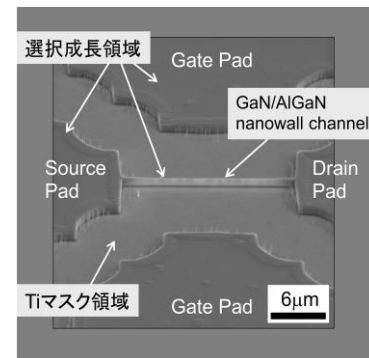


図 2. rf-MBE 法で選択成長した AlGaIn/GaN ナノウォール FET 結晶の鳥瞰 SEM 像

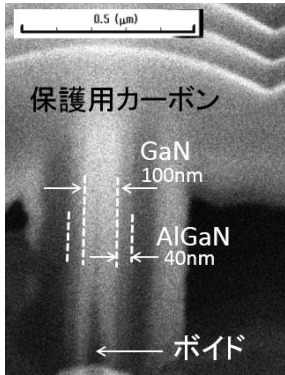


図 3. AlGaIn/GaN ナノウォール FET の断面 SEM 像

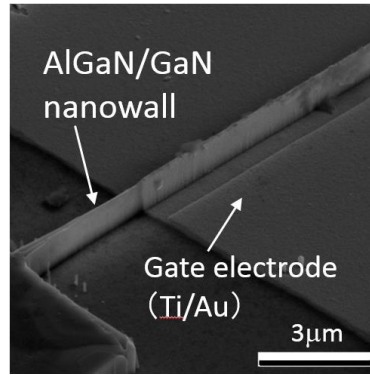


図 4. 電極形成後の AlGaIn/GaN ナノウォール FET の SEM 像

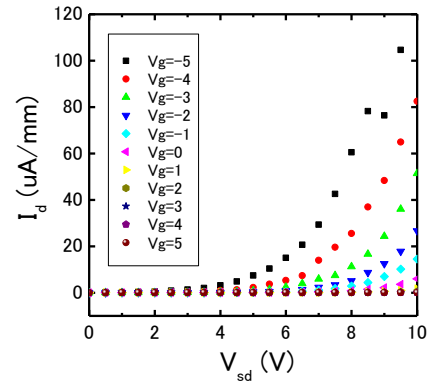


図 5. AlGaIn/GaN ナノウォール FET の静特性 ( $I_d$ - $V_{sd}$  特性)

マスク上にも成膜されると考え

られる。図 2 は、成長後の FET 領域の鳥瞰 SEM 像の例であり、ソース-ドレインパッド間に AlGaIn/GaN ナノウォールチャンネルが a 軸に沿って 1 本配置されている (図 1(a))。ナノウォールの幅は 120~200nm、高さは約 1.2 $\mu$ m であり、AlGaIn 層はナノウォール上部と側面を覆っていると考えられる。図 3 に AlGaIn/GaN ナノウォール部の断面 SEM 像を示す。GaN ナノウォール底部にはボイドの形成が確認された。また、AlGaIn 層の厚さは約 40nm でありナノウォール側面に均一に形成されていることがわかる。一方、ナノウォール上部における AlGaIn 層の厚さは SEM 像からは確認することができなかった。FET 作製プロセスでは、成長長したウェハ表面全体に ALD 法で Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 絶縁膜を 20nm 堆積後 (図 1(b))、ソースとドレインパッド部の絶縁膜を除去し (図 1(c))、Ti/Au を蒸着してソース、ゲートおよびゲート電極を形成した (図 1(d))。ゲート電極幅は 10 $\mu$ m とし、ナノウォール全体を被覆するためにチャンネル側面方向から斜め蒸着を 2 回実施した。図 4 はチャンネル部の SEM 像であり、チャンネル部全体がゲート電極で被覆されていることがわかる。図 5 に m 軸に沿ったナノウォール FET で得られた静特性 ( $I_d$ - $V_{sd}$  特性) を示す。ゲート電圧  $V_g$  の変化に伴いドレイン電流  $I_d$  が制御される様子か明瞭に

確認された。 $I_d$  の  $V_g$  による On/Off 比は約 10<sup>4</sup>、相互コンダクタンスは 1.9 $\mu$ S と見積もられた。デバイスプロセスを最適化していないため、ソースおよびドレイン電極の接触抵抗が高くデバイス特性は初期的なものではあるが、AlGaIn/GaN ナノウォールが電子デバイスに適用可能であることが示された。

## (b-2)水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法による InGaN/GaN ナノ構造

### b-2-1 HEATE 法による(0001)GaN のエッチング特性

窒化物半導体ナノ構造の新しい作製法である水素雰囲気異方性熱エッチング (Hydrogen Environment Anisotropic Thermal Etching: HEATE) 法を提案した<sup>\*b-ii</sup>。図 6 は HEATE 法で使用した雰囲気制御加熱装置の概略図で、管状炉と石英管、ガス導入系、真空排気系という簡便な構成である。試料には Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板上に MOCVD 法で Si ドープ(0001)面 GaN を 6 $\mu$ m 成長した GaN テンプレート基板を用いた。エッチングマスクには CVD 法で堆積した厚さ 50~100 nm の SiO<sub>2</sub> を用い、光露光とウェットエッチングで数 $\mu$ m 幅、あるいは電子ビーム描画と CHF<sub>3</sub> ドライエッチングで幅数十 nm~数百 nm の SiO<sub>2</sub> マスクを作製した。これらの試料を石英管内に挿入し、水素雰囲気下で加熱した後、SiO<sub>2</sub> マスクを除去して電子顕微鏡 (SEM) で表面形状を観察した。電子ビーム描画による SiO<sub>2</sub> ナノマスクを用いた HEATE プロセスの概要を図 7 に示す。

図 8(a)に、1050°C、10Pa、15min の条件で作製した GaN リッジ構造の鳥瞰 SEM 像を示す。高さは 1.2 $\mu$ m、エッチング速度は 80nm/min であった。図 8(b)~(d)はそれぞれ水素圧力を 10、100、300Pa と変化させたときのエッチング面の SEM 像であり、エッチング面に

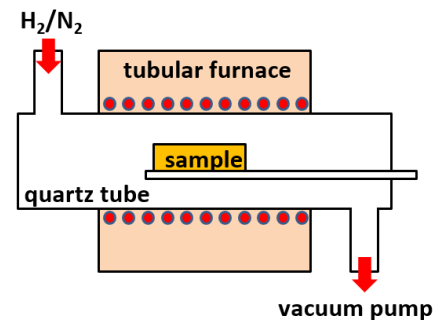


図 6. HEATE 雰囲気制御加熱装置の概念図.

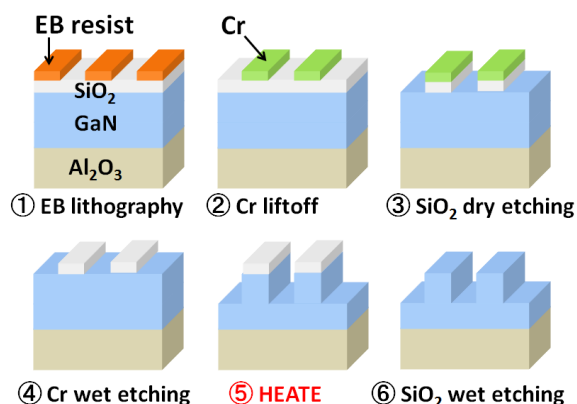
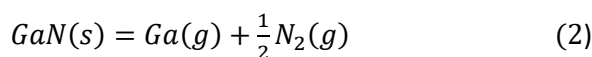
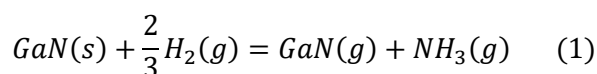


図 7. HEATE プロセスの概要.

は微細な錘状構造が形成され、水素圧力の増加に伴って構造が微細化することが確認された。図 9 にエッチング速度のアレニウスプロットを示す。エッチング速度は 15.5~200nm/min の範囲であり、温度と水素圧力の増加に伴い大きくなる傾向を示した。アレニウスプロットから算出した活性化エネルギーは水素圧力 10、100、300Pa において、それぞれ 62.3、69.8、76.7kcal/mol となり、水素圧力に伴いわずかに増加した。水素雰囲気中での GaN の分解反応は GaN が水素と反応して Ga とアンモニアに分解する反応 (1) と GaN が直接 Ga と窒素に分解する反応 (2) などが考えられる。これら 2 つの代表的な反応について Koukitsu らによって提案された熱力学解析法[1]を用い、以下の反応式を用いて HEATE 法での GaN の分解機構を考察した。



ここで、(s)と(g)はそれぞれ固相と気相を表す。平衡定数には文献値を用い、初期分圧と平衡分圧の差  $\Delta$

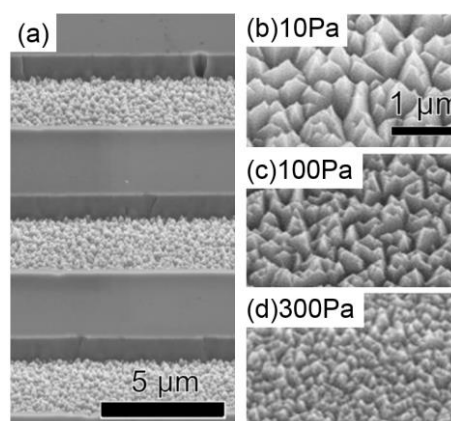


図 8. HEATE 法で作製した GaN リッジ構造 (a)とエッチング面の水素圧力依存性(b)-(d).

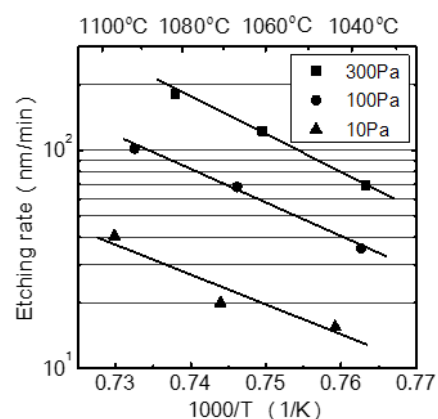


図 9. HEATE 法による(0001)GaN の垂直方向エッチング速度の温度依存性.

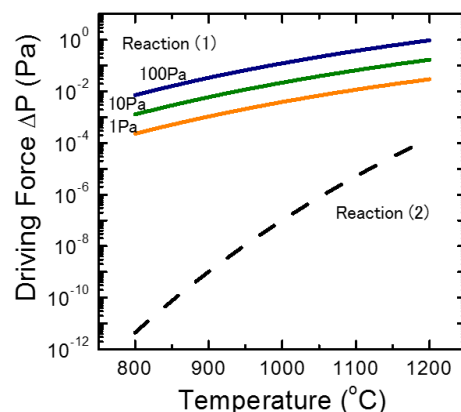


図 10. GaN の分解反応におけるエッチング駆動力の温度依存性. Reaction(1)と(2)は本文中の式(1)と(2)に対応する.

P がエッチングを進行させる駆動力となり、エッチング速度に比例する量とみなせる。図 10 は反応式(1)と反応式(2)におけるエッチング駆動力を温度に対してプロットしたものである。反応式(1)では水素圧力を 1、10、100 Pa に対して計算した。HEATE 法で使用する 800~1100°C の温度域では GaN が直接熱分解する反応式 (2) の駆動力は (1) 式の駆動力に比べて数桁低く、ほとんど寄与していないと考えられる。また、反応式 (1) のエッチング駆動力は水素圧力の増加に伴い増大した。式(1)から算出されたエッチングの活性化エネルギーは水素圧力 10、100、300Pa に対してそれぞれ 38.2、38.4、38.5kcal/mol であり、上述の実験値に近い値となった。これらの解析から HEATE 法では水素による GaN の化学的熱分解反応が主な機構であることが確認された<sup>\*b-ii</sup>。

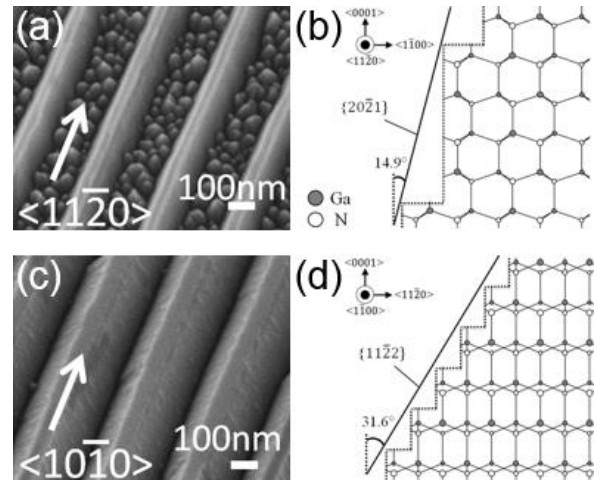


図 11. HEATE 法で作製した GaN ナノウォール構造の結晶方位依存性. (a) : a 軸ストライプ、(b) : m 軸ストライプ。

図 11 に HEATE 法で作製した GaN ナノウォール構造の鳥瞰 SEM 像を示す。SiO<sub>2</sub> マスクは GaN の a 軸に沿ったパターン(a)と m 軸に沿ったパターン(b)を用いた。エッチングは 1050°C、10Pa、15min で行った。ナノ構造の高さは約 240nm、上部幅 50nm の台形状であり、a 軸に沿ったナノ構造の側面は極めて平坦であり、m 面から 14.9 度傾斜した {2\_2 0 1} 面やその高指数面である {n\_n 0 2} 面 (n=5,6,7) が形成されていると考えられる。これらの面は自然面でなく、c 軸方向と m 軸方向のエッチング速度比によって決まると考えられる。一方、m 軸に沿ったナノ構造の側面は微細な突起構造を有し、a 面から 31.6 度傾斜した {1 1\_2 2} 面が形成された。また、円形 SiO<sub>2</sub> マスクを用いた場合には六角錘台構造のナノピラーが形成され、側面は六つの {2\_2 0 1} 面あるいは {n\_n 0 2} 面で囲われており、HEATE エッチングではこれらの面が安定面として形成されやすいことが確認された。図 12 に SiO<sub>2</sub> マスク除去前後でのナノウォール構造の上面

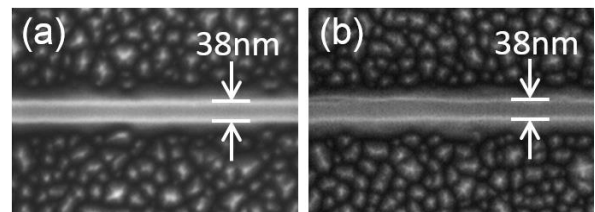


図 12. a 軸ナノウォールの上面 SEM 像. (a) SiO<sub>2</sub> 除去前、(b) SiO<sub>2</sub> 除去後。

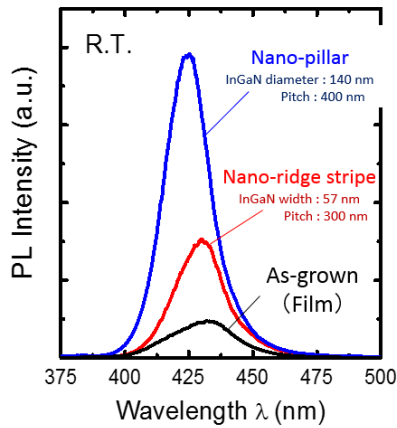


図 13. HEATE 法で作製した InGaN SQW を内在するナノ構造の室温 PL スペクトル。

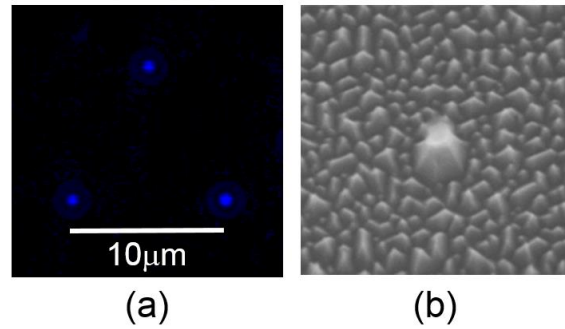


図 14. (a) 10 $\mu\text{m}$  周期で配列した InGaN/GaN 単一ナノピラーの室温蛍光顕微鏡像と (b) InGaN/GaN 単一ナノピラーの SEM 像. InGaN 量子ディスク直径は約 60nm.

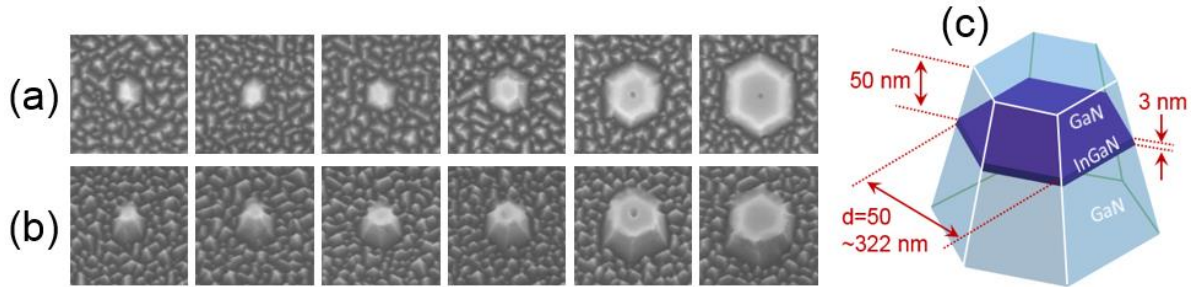


図 15. HEATE 法で作製した InGaN SQD を内在する GaN ナノピラーの(a)上面および(b)鳥瞰 SEM 像の例. InGaN-SQD の直径は左端が 50nm、右端が 322nm. (c)InGaN SQD ナノピラーの構造図.

SEM 像を示す。SiO<sub>2</sub> 除去前後でいずれも幅 38nm と変わらず、SiO<sub>2</sub> 下部のサイドエッチングが数 nm 以下と極めて少ない条件でエッチングされていることが確認された<sup>\*b-ii</sup>。

#### b-2-2 HEATE 法による InGaN/GaN ナノ構造の作製と光学特性評価

(0001)面 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板上に MOCVD 法で成長した p-GaN(50 nm)/In<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N(3nm)/n-GaN(60nm)/n-AlGaIn(100nm)/n-GaN (6 $\mu\text{m}$ )/i-GaN(3 $\mu\text{m}$ )構造の単一量子井戸 (SQW) LED エピウェハを用い、InGaN 量子井戸を内在するナノ構造を HEATE 法で作製した。HEATE 処理条件は、水素圧力 10 Pa、温度 1050°Cで 12.5 分間とし、高さ 100~110nm の a 軸方向ナノウォール、m 軸方向ナノウォール、三角格子配列ナノピラーおよび 150 $\mu\text{m}$ ×150 $\mu\text{m}$  のメサ構造等を作製し、He-Cd レーザ (波長 325 nm) による室温フォトルミネッセンス (PL) 測定、室温蛍光顕微鏡観察、室温時間分解 PL 測定、および温度依存 PL 測定を行った。

図 13 に InGaN-SQW 元ウェハおよび、HEATE で作製したナノウォール (InGaN 層幅 57nm、ピッチ 300nm)、ナノピラー構造 (InGaN 幅 140nm、ピッチ 400nm) の室温 PL ス

ペクトルを示す。InGaN 層が露出する深さで 1050°C の高温熱処理を経たにも関わらず InGaN 量子井戸からの明瞭な発光（ピーク波長 425nm）が観測された。HEATE 後のピーク波長は最大 15nm 短波長化しており、その原因には In の脱離や歪緩和、In 拡散による量子井戸の形状変化など複数の要因が考えられる。図 14 に周期 10 $\mu$ m で三角格子状に配列した直径約 60nm の InGaN 単一量子ディスク（SQD）ナノピラーの水銀ランプ励起室温蛍光顕微鏡像を示す。加工後の特別な処理を行わずに直径 60nm の単一 InGaN SQD から明瞭な室温発光が観察され、HEATE 法が低損傷な加工技術であることが示された<sup>\*b-iii</sup>。図 15(a) と (b) に作製した InGaN/GaN-SQD ナノピラー構造の上面 SEM 像および鳥瞰 SEM 像の例を示す。図 15(c) はナノピラーの構造図であり、内部に埋め込まれた六角形 InGaN ディスクの対辺間距離を直径  $d$  と定義すると、 $d=50$ nm から 322nm の InGaN SQD が得られた。

周期 400nm および 800nm で配置された InGaN SQD ナノピラーアレイの発光特性の InGaN ディスク直径依存性を調べた<sup>\*b-iv</sup>。図 16 に PL 強度の  $d$  依存性を示す。InGaN 層の直径や周期が異なる試料を比較するため、強度を InGaN 層の面積で規格化してプロットした。PL 強度は  $d$  が 200nm 以上の領域では発光強度はほぼ一定であり、 $d$  が 200nm から



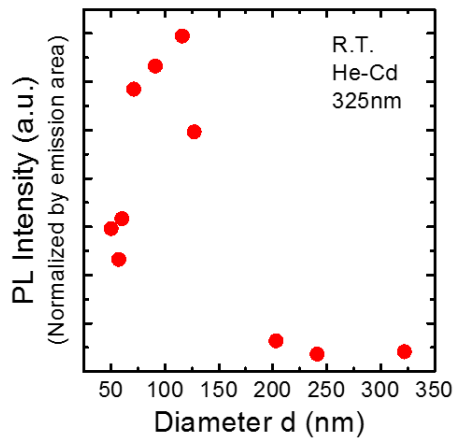


図 16. InGanSQD ナノピラーアレイの室温における PL 発光強度の SQD 直径  $d$  依存性. (PL 強度は活性層面積で規格化)

116nm に減少するにつれ急速に増加し、100nm 以下の領域で減少に転じた。 $d=166\text{nm}$  の強度は  $d=332\text{nm}$  に対して約 17 倍であり、この PL 強度の増加原因としてナノ構造による光取出し効率の向上、InGan の歪緩和効果、微細化に伴って貫通転位がピラー毎に隔離される貫通転位隔離効果等が考えられる。図 17 に PL ピーク波長の  $d$  依存性を示す。ピーク波長は  $d=332\text{nm}$  から 116nm までほぼ一定であり、100nm 以下の領域で短波長化が始まった。これは、 $d=100\text{nm}$  以下の領域で InGan 層の歪緩和効果が顕在化することを示唆している。

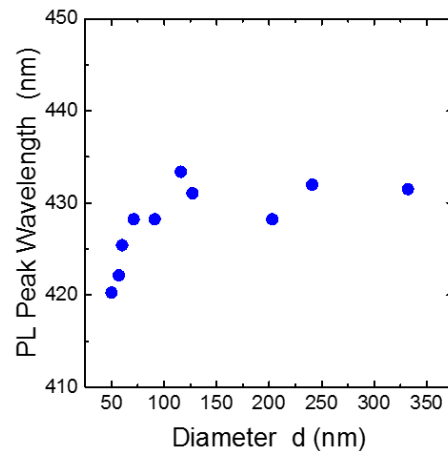


図 17. InGanSQD ナノピラーアレイの室温 PL ピーク波長の SQD 直径  $d$  依存性.

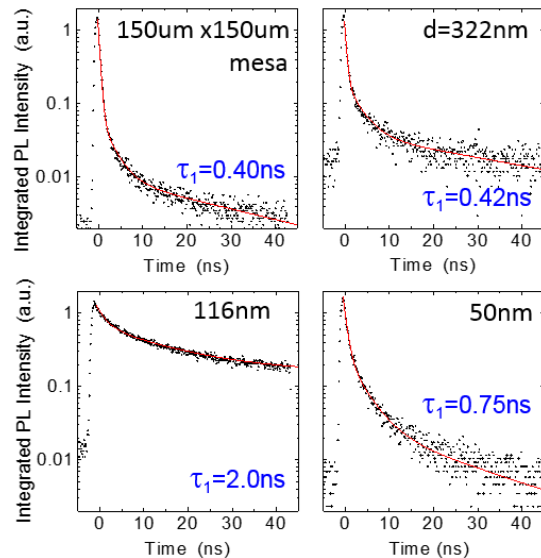


図 18. InGanSQD ナノピラーアレイの室温時間分解 PL 緩和特性の例.

図 18 に代表的な PL 強度の時間減衰（緩和）特性を示す。緩和特性は一般的に用いられる double exponential 関数と stretched exponential 関数では十分にフィッティングできず、式 (3) に示す triple exponential 関数を用いることで全試料の全時間領域における良好なフィッティングが行えた。フィッティング曲線を図中に実線で示した。

$$I(t) = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + A_3 \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right) \quad (3)$$

図 19 は、 $\tau_1$  の  $d$  依存性であり、 $d=332\text{nm}$  から  $116\text{nm}$  の領域では  $d$  の減少に従い  $\tau_1$  が増大し、 $100\text{nm}$  以下では  $\tau_1$  が急速に減少している。室温では非発光再結合が支配的で  $\tau_1$  が非発光再結合速度を示すと考えた場合、 $d$  の減少に伴う PL 強度の顕著な増加は非発光再結合の抑制が主な要因であると推察される。非発光再結合が抑制される主な原因として、貫通転位の隔離効果が考えられる。一方、 $d=100\text{nm}$  以下の領域では、 $d$  の減少に伴う発光強度の低下、発光波長の短波長シフト、 $\tau_1$  の減少が観察された。短波長化の原因としては、InGaN ディスク自由端での歪緩和効果、側面からの In の脱離、In の固相拡散等の影響が考えられる。また、 $\tau_1$  の減少は InGaN 層側面における表面非発光再結合が顕在化したためと考えられる。

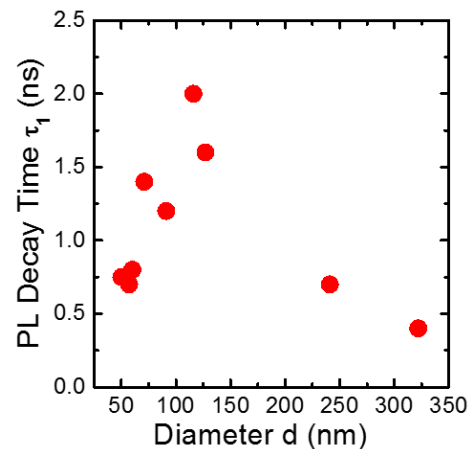


図 19. InGaN SQD ナノピラーアレイの室温 PL 緩和時間 $\tau_1$  の SQD 直径  $d$  依存性。

規格化発光強度が最も強かった InGaN SQD ナノピラー ( $d=116\text{nm}$ ) と比較用の InGaN SQW メサ ( $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ ) に対して、He-Cd レーザによる低励条件で温度依存 PL 測定を行った。4K の PL 発光効率を 100% と仮定し、室温と 4K の PL 積分強度比を PL 量子効率  $\eta_{\text{PL}}$  と定義したところ、ナノピラーが  $\eta_{\text{PL}}=9.3\%$ 、メサ構造が  $\eta_{\text{PL}}=1.5\%$  となり、ナノピラー構造により効率が約 6 倍に向上した<sup>\*b-iv</sup>。

以上のように、HEATE 法で作製した直径 200~50nm のナノピラー構造において顕著な発光効率の向上効果が得られ、HEATE 法がナノ構造形成に適した低損傷な加工法であることが示された。一方、直径 100nm 以下の領域では表面非発光再結合の影響が顕在化することから、適切な表面安定化処理によりナノ構造効果の更なる発現も期待される。

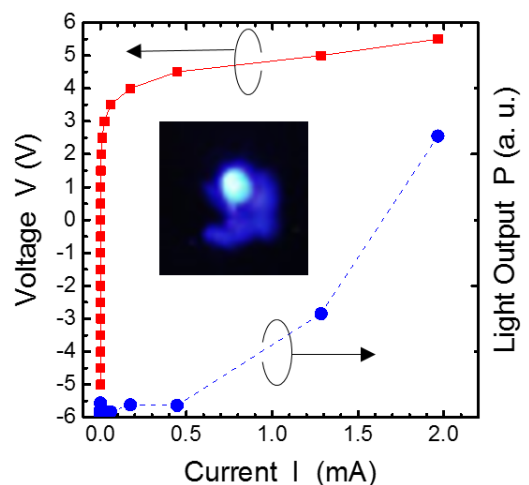


図 20. HEATE 法で作製した InGaN/GaN ナノウォール LED の室温電流注入発光特性の例。挿入図は発光時の写真。

### b-2-3 HEATE 法による InGaN/GaN ナノ LED の作製と評価

HEATE 法を用いて作製した InGaN/GaN ナノ構造 pn 接合 LED に対し、初期的な電流注入発光特性の評価を行った。HEATE 加工後、試料表面を SOG で埋め込み、CF<sub>4</sub> プラズマエッチングで p 層の一部を露出させた後、50μm×50μm のナノパターン領域全面に ITO 電極を形成した。図 20 に、a 軸方向に沿った InGaN ナノウォール LED の電流－電圧－光出力特性の例を示す。電流電圧特性は良好な整流性を示し、順方向立ち上がり電圧は約 4V、逆方向リーク電流は-5V 印加時に-6.4nA であった。順方向電流注入時に明瞭な青色発光が観察され、電流の増加に伴い光出力が増加した。初期的段階ではあるが、HEATE 法によって作製した InGaN ナノ構造 LED における電流注入発光を実証した<sup>\*b-x</sup>。

参考文献 [1] A. Koukitu and H. Seki, Jpn. J. Appl. Phys. 36, (1997) L750.

### (b-3) 無機/有機ハイブリッド LED

#### b-3-1 ZnO/F8BT/MoO<sub>3</sub> IO-HyLED と中間層の効果

図 21 に、ZnO/F8BT/MoO<sub>3</sub>系 IO-HyLED の簡略化したバンドラインナップを示す。正孔輸送層兼緑色発光層である F8BT を無機半導体である MoO<sub>3</sub> と Al ドープ ZnO (AZO) でクラッドした構造を有する。この構成において正孔は MoO<sub>3</sub> の価電子帯上端 (VBM) から F8BT の最高占有分子軌道 (HOMO) へ高効率で注入されることが知られている。一方、電子は ZnO の伝導帯下端 (CBM) から F8BT の最低非占有分子軌道 (LUMO) へ注入されるが、約 0.74 eV のオフセットにより電子注入障壁が形成され、発光特性を制限する一因となっている。この ZnO から F8BT への電子注入効率を改善するため、本研究ではバンドエンジニアリングに基づいた階段状 Mg<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O 層および SADM 層の導入効果を検討した。

図 21(b)に中間層を挿入した場合のバンドラインナップを示す。MgZnO は Mg 組成の増加に伴いバンドギャップが増加するが、同時にドーピング効率が低下して導電性が低下するため 10 nm の薄膜を用いた。ZnO と F8BT 間の伝導帯オフセット（電子注入障壁） $\Delta E_c$  は約 0.74 eV であるが、Mg 組成比  $x=0.25$ 、 $0.52$  の MgZnO 層を挿入すると計算上は  $\Delta E_c$  がそれぞれ 0.37、 $-0.3$  eV に低減すると期待される。ここでは、組成の異なる MgZnO を 2 段階に挿入することによって n 型無機層の伝導帯を階段状にしてノッチの低減効果を狙った。一方、自己配列双極子分子（SADM）分子内に正負電荷の偏りがあり、自己組織的に配向した単分子膜を形成しやすい性質をもった分子である。ここでは SADM として BA-CH<sub>3</sub>（4-メチル安息香酸）を用いた。COOH 基が MgZnO 表面に結合する配向で整列した場合には、双極子層に形成により、図 21(b)に示すように電子注入障壁の低下が期待される。ただし、双極子の電荷密度は分子の面密度や配向度に大きく依存し、定量化が難しいことからここでは定性的に図示した。

### b-3-2 DMD 上 ZnO/F8BT/MoO<sub>3</sub> IO-HyLED

MoO<sub>3</sub>/F8BT/ZnO 系 IO-HyLED における新しい試みとして、AZO/Ag/AZO-DMD を透明導電膜として利用した<sup>\*b-vi</sup>。DMD の構造は ZnO(38nm)/Ag(9nm)/ZnO(40nm)とし、イオンビームスパッタ法を用いて室温で成膜した。F8BT の発光ピーク波長に近い 555nm の透過率とシート抵抗値は、市販の ITO コートガラス上に AZO をイオンビームスパッタ法で堆積した ZnO(103nm)/ITO(140nm)膜で 83.5%と 14.2Ω/sq、DMD 膜で 90.5%と 9Ω/sq であり、DMD 膜が良好な特性を有することを確認した。これらの透明導電膜上に F8BT（約 50 nm）をスピコートで成膜後、正孔注入層として MoO<sub>3</sub>層（10 nm）

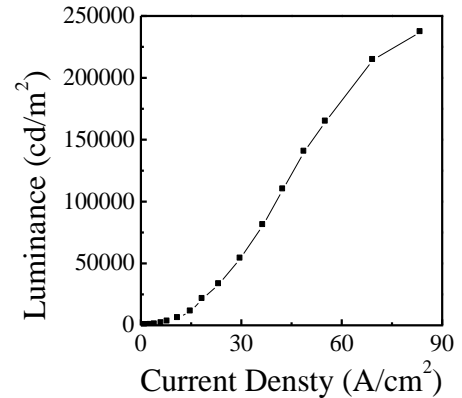


図 22. ZnO/Ag/ZnO-DMD 上 F8BT/MoO<sub>3</sub> IO-HyLED の電流密度-発光輝度特性。

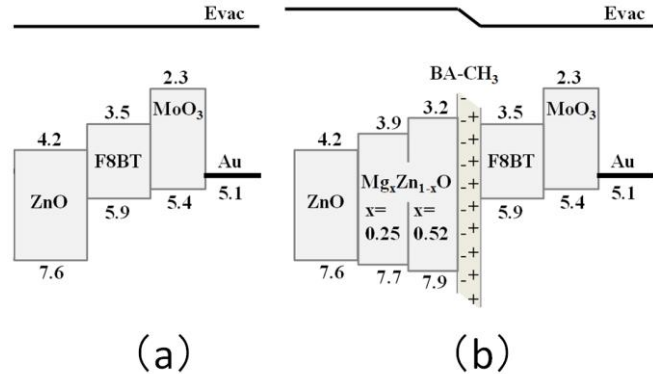


図 21. AZO/F8BT/MoO<sub>3</sub> IO-HyLED の簡略化したバンドラインナップ. (a)：中間層のない構造、(b)：MgZnO/SADM 多重中間層を挿入した構造

と p 側電極 Au (60 nm) を抵抗加熱蒸着法で形成して発光特性を比較した。大気中室温パルス駆動 (Duty 比 10%, パルス幅 1 $\mu$ sec) では、DMD を用いた試料と ITO/ZnO を用いた試料でほぼ同等な電流-電圧特性および発光特性が得られ、DMD が n 型無機層として有効であることを確認した。また、DMD を用いた素子に対して、Duty 比を 1% に低減して熱と劣化の影響を抑制した条件において大電流駆動を試みたところ、図 22 に示すように、電流密度 86A/cm<sup>2</sup>、電圧 15 V においてピーク輝度 237,000 cd/m<sup>2</sup> という高い発光輝度が得られた<sup>\*b-vi</sup>。

### b-3-3 MgZnO/SADM 多重中間層の挿入効果

ZnO から F8BT への電子注入効率の改善を目指し、ZnO/F8BT 界面への中間層の挿入効果を検証した。中間層の構成を変えた 5 種類のデバイス (A~E) を作製した。各デバイスの中間層の構造は、それぞれ A:中間層なし、B:Mg<sub>0.25</sub>Zn<sub>0.75</sub>O、C:Mg<sub>0.52</sub>Zn<sub>0.48</sub>O、D:SADM、および E:Mg<sub>0.25</sub>Zn<sub>0.75</sub>O/Mg<sub>0.52</sub>Zn<sub>0.48</sub>O/SADM とした。図 23 に MgZnO と SADM を組み合わせた多重中間層を挿入したデバイス E の断面構造図を示す。全てのデバイスは AZO(40 nm)/Ag(9 nm)/AZO(38 nm)-DMD 上に作製した。デバイス E の場合、DMD 上にイオンビームスパッタで Mg<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O (x=0.25, 0.52) を順に堆積した後、BA-CH<sub>3</sub> と F8BT をそれぞれ溶媒にエタノールとトルエンを用いスピコート法で成膜し、最後に MoO<sub>3</sub>(20 nm) と Au(70 nm) を真空蒸着法で堆積した。F8BT 層の膜厚は 50 nm で一定とした。

室温大気下におけるデバイスの電流密度-発光輝度特性を図 24 に示す。1,000 A/cm<sup>2</sup> における輝度は A が最も低く、続けて B、C、D、E の順に増加した。デバイス A、B、C は F8BT 層に隣接する Mg<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O の組成が x=0、0.25、0.52 と順に増加することから、電子注入障壁が減少して電子と正孔のキャリア注入バラ

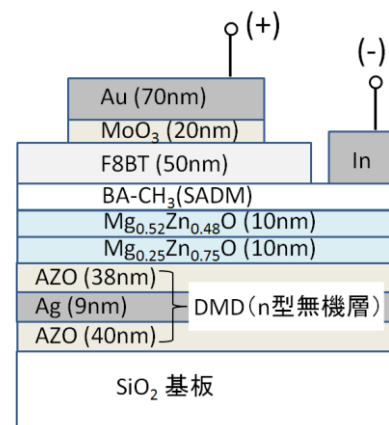


図 23. MgZnO/SADM 多重中間層を用いた AZO/F8BT/MoO<sub>3</sub> HyLED の構造図

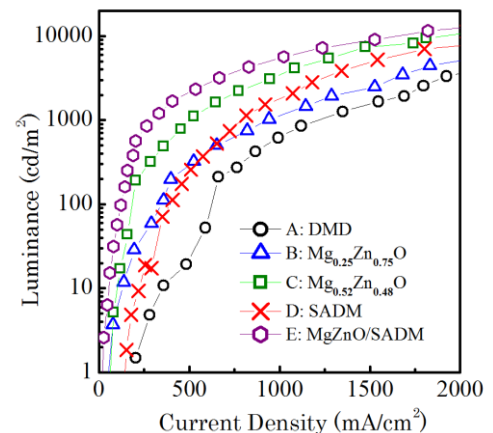


図 24. 5 種類の異なる中間層を挿入した AZO/F8BT/MoO<sub>3</sub> IO-HyLED の発光輝度-電流密度特性

ンスが改善した効果であると考えられる。さらに、SADM を挿入したデバイス D においても双極子分子による電子注入障壁の減少効果が生じていると考えられる。

$\text{Mg}_{0.25}\text{Zn}_{0.75}\text{O}/\text{Mg}_{0.52}\text{Zn}_{0.48}\text{O}$  と SADM を組合せた多重中間層を挿入したデバイス E において最も高い特性が得られたことから、MgZnO と SADM は相乗的に効果を発現できる中間層であることを見出した<sup>\*b-v</sup>。

#### b-3-4 多電極型静電塗布法

低分子有機デバイスの成膜には真空蒸着法に代表されるドライプロセスが主に用いられているが、高コスト・低材料利用効率などの課題を有する。低コストで材料利用効率に優れ、大面積適応性が期待されるウェットプロセスの一種である静電塗布法(Electro Spray deposition : ESD 法)に着目し、金属ノズル近傍に引出し電極を付加した三電極型 ESD 法をナノミスト堆積法(NMD 法)と呼び有機薄膜成膜法としての適用性を検討した。NMD 法を用いて緑色発光高分子有機半導体である F8BT を ZnO と  $\text{MoO}_3$  で挟んだ IO-HyLED を作製し、スピコート法と遜色ない発光特性が得られることを確認した<sup>\*b-vii</sup>。さらに、NMD 法において液系が複数に分裂するマルチジェット(MJ)モードを用いると、液滴の堆積痕が直径  $1\mu\text{m}$  以下に微細化するとともにサイズ分布が顕著に狭くなり、平坦性に優れた成膜が可能であることを見出した<sup>\*b-xi</sup>。この手法を代表的な低分子有機 EL 材料である  $\text{Alq}_3$  や NPB、CBP 等に適用し、表面粗さ RMS 値が数 nm の平坦で均一な成膜が可能であることを見出した。また、同一溶媒を用いた  $\text{Alq}_3$ /NPB 積層構造の作製も可能であることを示した<sup>\*b-xii</sup>。

#### b-3-5 MgZnO/Ag(Al)/MgZnO-DMD の開発

DMD 構造は、高い透過性と電気導電性を有する透明導電膜として期待されている。ここでは、誘電体層に紫外域まで高い透過率を有する Al ドープ MgZnO(AMZO)を用いた AMZO/Ag/AMZO-DMD の開発と Ag 層への Al ドープ効果を検討した。DMD 構造は  $\text{SiO}_2$  基板上にイオンビームスパッタ法で室温において積層し、成膜後に  $100\sim 500^\circ\text{C}$  で 60 分間の真空熱処理を行った。Ag(Al)の Al ドープ濃度は 1.7 at%、DMD の膜厚設計値は  $50\text{nm}/10\text{nm}/50\text{nm}$  とした。図 25 は作製した DMD の紫外～可視域透過スペクトルであり、紫外～可視域にわたる高い透過率が得られた。成膜直後の紫外(UVA)から可視( $315\sim 780\text{nm}$ )全域における平均透過率  $T_{\text{AVE}}$  とシート抵抗  $R_s$  は、それぞれ 88.0 %、 $16.5 \Omega/\text{sq}$  と優れた特性を示した。さらに  $400^\circ\text{C}$  の熱処理によって  $T_{\text{AVE}}$  と  $R_s$  はそれぞれ 88.2%と  $7.6 \Omega/\text{sq}$  に向上した

\*b-ix。ZnO/Ag/ZnO 系 DMD では 300 °C の熱処理で透過率が大きく低下するが、今回作製した AMZO/Ag(AI)/AMZO-DMD では、400 °C の高温熱処理後も高い透過率を維持し、Ag 層への Al ドーピングが耐熱性の向上に有効であることを見出した\*b-viii。

### 3. 研究成果

(b-1) ナノウォール：AlGaIn/GaN ヘテロ構造ナノウォールをチャンネルに用いる MOS-FET 構造を試作し、静特性 ( $I_d$ - $V_{sd}$  特性) を評価し、ゲート電圧による明瞭なドレイン電流の制御を確認し、世界初の AlGaIn/GaN ナノウォール FET 作製および動作実証を行った\*b-i。

(b-2) 水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法による InGaIn/GaN ナノ構造：簡便かつ毒性ガスを用いない水素雰囲気異方性熱エッチング(HEATE)法による(0001)面 GaN の熱分解特性を評価し、加工面の最表面までアモルファス化のない低損傷なエッチング手法であることを見出した\*b-ii。HEATE 法で作製した GaN ナノ構造のエッチング異方性と安定面の関係を精査し、a 軸に沿ったナノ構造の側面には{2 2 0 1}面やその高指数面{n n 0 2}面 (n=5,6,7)が、m 軸に沿ったナノ構造の側面は{1 1 2 2}面が形成され、前者がより安定であることを見出した。HEATE 法を用いて直径 10nm 以下の GaN ナノピラーの作製に成功した。また、InGaIn 単一量子ディスクを含むナノピラー構造を作製し、直径 50nm 以下の InGaIn 単一量子ディスクからの室温発光を得た\*b-iii。HEATE 法で作製した InGaIn-SQD ナノピラーの発光特性のサイズ依存性を調べ、規格化発光強度が直径 200nm から 116nm の領域で急速に増加 (10 倍以上) することを見出した\*b-iv。また、HEATE 法で作製したナノウォール LED やナノピラーLED における室温電流注入発光を確認した\*b-x。

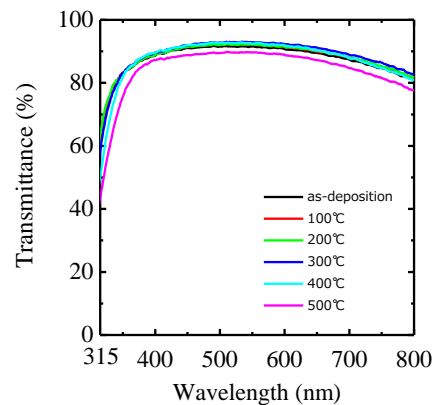


図 25. AMZO/Ag(AI)/AMZO-DMD の投下スペクトルの熱処理温度依存性。

(b-3) 無機/有機ハイブリッド LED：蛍光系 (F8BT) および燐光系 (PVK : Ir(ppy)<sub>3</sub>) 有機発光層を ZnO と MoO<sub>3</sub> で挟んだ無機/有機ハイブリッド LED

(IO-HyLED) に、MgZnO や自己配列双極子分子、Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> を組合せた多重中間層を導入し、

発光特性の顕著な向上が得られることを見出した<sup>\*b-v</sup>。MoO<sub>3</sub>/F8BT/ZnO 系 IO-HyLED において、ZnO/Ag/ZnO 多層構造 (DMD) が ITO と遜色ない透明導電膜として利用可能であることを示し、Duty 比 1% のパルス駆動でピーク輝度 237,000 cd/m<sup>2</sup> という高輝度発光を得た<sup>\*b-vi</sup>。また低コスト大面積化が期待される三電極型静電塗布法 (ナノミスト堆積 (NMD) 法と呼称) を用いて F8BT 系ハイブリッド LED を作製し、NMD 法が有機系デバイス作製に有効であることを示した<sup>\*b-vii, xi, xii</sup>。DMD の Ag 層に Al を微量添加することにより耐熱性が向上することを見出し<sup>\*b-viii</sup>、MgZnO/Ag(Al)/ MgZnO-DMD を作製し紫外 (UVA) から可視 (315~780nm) 全域における平均透過率 T<sub>AVE</sub> が 88.2%、シート抵抗 R<sub>S</sub> が 7.6 Ω/sq. という優れた透明導電性を得た<sup>\*b-ix</sup>。



## 研究発表リスト

### 論文

- b1. <sup>\*b-ix</sup> Yukiko Sugimoto, Kanae Igarashi, Shinya Shirasaki, and Akihiko Kikuchi, "Effect of Al doping in the Ag layer of MgZnO/Ag/MgZnO dielectric/metal/dielectric UV-visible transparent conductive films", *Physica Status Solidi C*, (2016) online 16 Mar. 2016. (DOI: 10.1002/pssc.201510290)
- b2. <sup>\*b-viii</sup> Yukiko Sugimoto, Kanae Igarashi, Shinya Shirasaki, and Akihiko Kikuchi, "Thermal durability of AZO/Ag(Al)/AZO transparent conductive films", *Japanese Journal of Applied Physics*, 55 (2016) 04EJ15. (DOI: 10.7567/JJAP.55.04EJ15)
- b3. <sup>\*b-vii, xi</sup> Yoshiki Niinuma, Yusuke Takatsuka, Ryo Terada, Hiroyuki Ueda and Akihiko Kikuchi, "Deposition characteristics of small-molecule CBP:PBD:TPD:Ir(mppy)<sub>3</sub> organic thin films using a modified electrospray deposition method", *Japanese Journal of Applied Physics*, 55 (2016) 04EL01. (DOI:10.7567/JJAP.55.04EL01)
- b4. <sup>\*b-ii</sup> R. Kita, R. Hachiya, T. Mizutani, H. Furuhashi and A. Kikuchi, "Characterization of hydrogen environment anisotropic thermal etching and application to GaN nanostructure fabrication", *Japanese Journal of Applied Physics*, 54 (2015) 046501. (DOI:10.7567/JJAP.54.046501)
- b5. <sup>\*b-v, vi</sup> Yuhei Shimada, Junichi Ishino, Shinya Shirasaki, Takayuki Irie, and Akihiko Kikuchi, "Effect of MgZnO-bilayer/BA-CH<sub>3</sub> combination interlayer on emission characteristics of MoO<sub>3</sub>/F8BT/ZnO hybrid light emitting diodes fabricated on ZnO/Ag/ZnO transparent cathode", *Displays*, 34, 5 (2013) 437-441. (citation index = 0)
- b6. Akihiko Kikuchi and Tomoyuki Tsuji, "Electroluminescence Characteristics of Inorganic (p-GaN/MgO)-Organic (Alq<sub>3</sub>) Hybrid p-n Junction Light Emitting Diodes", *MRS Online Proceedings Library*, 1286, January 2011, mrsf10-1286-e03-38.

### 図書

- b7. 菊池昭彦、「MoO<sub>3</sub>/ZnO/F8BT 系 無機/有機複合型 LED の作製と評価」、pp.40-46、月刊ディスプレイ Vol.18No.9、2012年9月号、(株)テクノタイムズ社、2012年9月1日発行。

### 学会

- b8. <sup>\*b-ix</sup> 五十嵐佳苗、杉本悠紀子、菊池昭彦、"AMZO/Ag(Al)/AMZO-DMD における薄膜 Ag 層の Al ドープ効果", 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 20a-S222-10, 東工大 大岡山キャンパス, 2016年3月19日-22日。

- b9. <sup>\*b-xi</sup> 寺田諒、新沼佳樹、高塚祐輔、上田裕之、菊池昭彦、"ナノミスト堆積法による低分子有機薄膜の成膜条件依存性", 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 20p-W242-9, 東工大 大岡山キャンパス, 2016 年 3 月 19 日-22 日.
- b10. <sup>\*b-xii</sup> 上田裕之、高塚祐輔、新沼佳樹、寺田諒、菊池昭彦、"ナノミスト堆積法による Alq<sub>3</sub>/NPB 低分子積層構造の成膜特性", 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 20a-W242-1, 東工大 大岡山キャンパス, 2016 年 3 月 19 日-22 日.
- b11. 石嶋駿、小川航平、水谷友哉、蜂屋諒、菊池昭彦、"水素雰囲気熱処理 InGaN/GaN 多重量子井戸層の発光特性評価及び水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法によるナノ構造の作製", 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 19p-H121-11, 東工大 大岡山キャンパス, 2016 年 3 月 19 日-22 日.
- b12. <sup>\*b-x</sup> 小川航平、蜂屋諒、水谷友哉、石嶋駿、菊池昭彦、"水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法による InGaN/GaN 単一量子ディスクナノ LED の作製", 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 19p-H121-12, 東工大 大岡山キャンパス, 2016 年 3 月 19 日-22 日.
- b13. <sup>\*b-iii, iv</sup> Akihiko Kikuchi, Ryo Hachiya, Tomoya Mizutani, Shun Ishijima, and Kouhei Ogawa, "Low-damage top-down fabrication of InGaN/GaN single quantum disk nanopillars by hydrogen environment anisotropic thermal etching", 4th Nano Today Conference, D3.1, Dubai, December 6-10, 2015.
- b14. <sup>\*b-vii</sup> Akihiko Kikuchi, Yoshiaki Niinuma, Yusuke Takatsuka, Hiroyuki Ueda, and Ryo Terada, "Investigation of modified electro spray deposition technique for fabricating small-molecule based organic multilayer structures", 2015 Materials research Society (MRS) Fall Meeting & Exhibit, BB3.31, Boston, USA, November 29 - December 4, 2015.
- b15. <sup>\*b-vii</sup> Y. Niinuma, D. Nishi, J. Ishino and A. Kikuchi, "Deposition Characteristics of Small Molecule Organic Thin Film (CBP:PBD:TPD:Ir(mppy)<sub>3</sub>) by Modified Electro spray Deposition", The 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2015), PS-10-7, Sapporo, Japan, September 27-30, 2015.
- b16. <sup>\*b-viii</sup> Y. Sugimoto, K. Igarashi and A. Kikuchi, "Study on Thermal Durability of AZO/Ag(Al)/AZO Transparent Conductive Film", The 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2015), PS-8-20, Sapporo, Japan, September 27-30, 2015.
- b17. <sup>\*b-viii</sup> Yukiko Sugimoto and Akihiko Kikuchi, "Effect of Al doping in Ag layer of MgZnO/Ag/MgZnO dielectric/metal/dielectric (DMD) UV-visible transparent conductive films", 17th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials, ThP-8, Paris, France, September 13-18, 2015.
- b18. 水谷友哉、蜂屋諒、小川航平、石嶋駿、菊池昭彦、"水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法によって作製した InGaN/GaN 単一量子ディスクナノピラーの光学特性", 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 16a-1D-9, 名古屋国際会議場, 2015 年 9 月 13 日-16 日.
- b19. 高塚祐輔、新沼佳樹、上田裕之、寺田諒、菊池昭彦、"ナノミスト堆積 (多電極型静電塗布) 法による低分子 Alq<sub>3</sub> 成膜特性における噴霧モードの影響", 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 14a-1E-5, 名古屋国際会議場, 2015 年 9 月 13 日-16 日.
- b20. <sup>\*b-ii, iii, iv</sup> Akihiko Kikuchi, Ryo Hachiya, and Tomoya Mizutani, "Fabrication of InGaN/GaN quantum well based nanostructures by hydrogen environment anisotropic thermal etching

(HEATE)", Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices – 2015 German-Japanese-Spanish Joint Workshop –, Mo-5, Kyoto, Japan, July 11-14, 2015. (招待講演)

- b21. <sup>\*b-ii</sup> A. Kikuchi, R. Kita, R. Hachiya, and T. Mizutani, "Fabrication of GaN based nanostructures by hydrogen environment anisotropic thermal etching (HEATE)", The 7th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors, TUP2-38, Seoul, Korea, May 17-20, 2015.
- b22. <sup>\*b-ii</sup> 菊池昭彦、蜂屋諒、水谷友哉、"窒化物半導体ナノ結晶デバイス作製に向けた水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法の検討"、日本学術振興会 将来加工技術第136委員会平成26年度第1回研究会 (第145委員会協賛)、東京、2015年4月23日。(招待講演)
- b23. 水谷友哉、蜂屋諒、古橋洋樹、喜多諒、菊池昭彦、"水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE)法による InGaN/GaN 多重量子井戸ナノ構造の作製"、第62回応用物理学会春季学術講演会、13p-B1-4、東海大学湘南キャンパス、2015年3月11日-14日。
- b24. 新沼佳樹、西大紀、石野隼一、菊池昭彦、"多電極型静電塗布法 (ナノミスト堆積法) による低分子 (CBP:PBD:TPD:Ir(mppy)<sub>3</sub>) 有機薄膜の成膜特性の検討"、第62回応用物理学会春季学術講演会、11a-D2-11、東海大学湘南キャンパス、2015年3月11日-14日。
- b25. 喜多諒、蜂屋諒、菊池昭彦、"水素雰囲気異方性熱エッチングによる超微細ナノ GaN 構造の作製"、第62回応用物理学会春季学術講演会、11p-A21-9、東海大学湘南キャンパス、2015年3月11日-14日。
- b26. R. Hachiya, R. Kita, and A. Kikuchi, "Fabrication of GaN/InGaN/GaN single quantum well nano-structures by hydrogen environment anisotropic thermal etching (HEATE)", 10th international Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED2014), Tu-P05, Kaohsiung, Taiwan, December 14-19, 2014.
- b27. 水谷友哉、蜂屋諒、古橋洋樹、喜多諒、菊池昭彦、"水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE)法による InGaN/GaN 量子井戸ナノ構造の作製"、応用物理学会 結晶工学分科会第3回結晶工学未来塾、学習院大学、東京、2014年11月13日。
- b28. <sup>\*b-vii</sup> Yusuke Takatsuka, Takayuki Irie, Daiki Nishi, and Akihiko Kikuchi, "Investigation of initial deposition stage of small molecule Alq<sub>3</sub> on □-NPD layer by modified electro-spray deposition (ESD) technique (nano-mist deposition: NMD)", 2014 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2014), PS-10-13, Tsukuba, Japan, September 8-11, 2014.
- b29. 杉本悠紀子、菊池昭彦、"AMZO/Ag(Al)/AMZO-DMD の熱処理効果"、第75回応用物理学会秋季学術講演会、19a-A10-6、北海道大学、2014年9月17日-20日。
- b30. 新沼佳樹、石野隼一、菊池昭彦、"ナノミスト堆積法 (多電極型静電塗布法) による ZnO 薄膜の成膜と評価"、第75回応用物理学会秋季学術講演会、19a-A10-4、北海道大学、2014年9月17日-20日。
- b31. 喜多諒、蜂屋諒、菊池昭彦、"水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE)法による GaN ナノ構造作製とその熱力学的解析"、第75回応用物理学会秋季学術講演会、18p-C5-11、北海道大学、2014年9月17日-20日。
- b32. 蜂屋諒、喜多諒、菊池昭彦、"水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE)法で作製した

- InGaN/GaN 量子井戸ナノ構造の光学特性評価", 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 18p-C5-10, 北海道大学, 2014 年 9 月 17 日-20 日.
- b33. 石野隼一, 新沼佳樹, 菊池昭彦, "ナノミスト堆積法(多電極型静電塗布法)による MgZnO 薄膜の基礎的検討", 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-A10-3, 北海道大学, 2014 年 9 月 17 日-20 日.
- b34. 高塚祐輔, 西大紀, 菊池昭彦, "ナノミスト堆積法(多電極型静電塗布法)を用いた Alq<sub>3</sub>/α-NPD 薄膜積層構造の成膜評価", 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 17p-A5-17, 北海道大学, 2014 年 9 月 17 日-20 日.
- b35. 西大紀, 石野隼一, 菊池昭彦, "ナノミスト堆積法(多電極型静電塗布法)による高分子 F8BT 薄膜の表面モロロジー制御及び OLED の作製", 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 17a-A4-8, 北海道大学, 2014 年 9 月 17 日-20 日.
- b36. <sup>\*b-ii</sup> A. Kikuchi, R. Kita, and R. Hachiya, "Hydrogen Environment Anisotropic Thermal Etching (HEATE) of (0001) GaN for Nanostructure Fabrication", The 8th International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2014), TuGP69, Wroclaw, Poland, August 24-29, 2014.
- b37. <sup>\*b-ii</sup> R. Kita, H. Hachiya, R. Hachiya, and A. Kikuchi, "Fabrication of GaN nanostructure by hydrogen environment anisotropic thermal etching (HEATE) technique", 56th Electronic Materials Conference, D4, Santa Barbara, USA, June 22-25, 2014.
- b38. 高塚祐輔, 入江崇之, 菊池昭彦, "ナノミスト堆積法(多電極型静電塗布法)法を用いた Alq<sub>3</sub>/α-NPB 膜積層構造の成膜初期過程の評価", 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 20p-E5-1, 神奈川, 2014 年 3 月 17-20 日.
- b39. 蜂屋諒, 菊池昭彦, 蜂屋太樹, 喜多諒, "水素雰囲気異方性熱エッチング(HEATE)法による GaN ナノ構造の作製", 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-E13-13, 神奈川, 2014 年 3 月.
- b40. <sup>\*b-vii</sup> 菊池昭彦, "ナノミスト堆積法による有機/無機ハイブリッド LED の作製と評価", 第 43 回静岡大学若手グローバル研究リーダー育成拠点 (GRL) セミナー, 2014 年 1 月 14 日. (招待講演)
- b41. 蜂屋太樹, 菊池昭彦, "GaN の水素雰囲気異方性熱エッチング(HEATE)法におけるサイドエッチング特性の評価", 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-B5-12, 京都, 2013 年 9 月 16-20 日.
- b42. 白崎慎也, 菊池昭彦, "Ag/MgZnO-DMD 紫外域透明導電性材料の作製", 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 18p-D3-4, 京都, 2013 年 9 月 16-20 日.
- b43. 入江崇之, 西大紀, 菊池昭彦, "ナノミスト堆積法(多電極型静電塗布法)による α-NPD 薄膜の平坦化に向けた成膜条件の評価", 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 18a-C4-14, 京都, 2013 年 9 月 16-20 日.

- b44. <sup>\*b-v</sup>石野隼一, 島田雄平, 菊池昭彦, "燐光系無機/有機ハイブリッド LED における AZO/Ag/AZO 透明導電膜と二重中間層の導入効果", 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 18a-C4-9, 京都, 2013 年 9 月 16-20 日.
- b45. Akihiko Kikuchi, Shinya Shirasaki, and Ryo Kita, "Characterization of Ag/ZnO based metal dielectric multilayer (MDM) transparent conductive film", 16th International Conference on II-VI Compound and Related Materials (II-VI 2013), Mo-A4, Nagahama, Japan, September 9-13, 2013.
- b46. <sup>\*b-ii</sup>H. Hachiya and A. Kikuchi, "Hydrogen Environment Anisotropic Thermal Etching (HEATE) of GaN for the Fabrication of High-Aspect Nanostructure", 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), TuPH-10, Kyoto, Japan. June 30-July 4, 2013.
- b47. <sup>\*b-v</sup>Junichi Ishino, Yuhei Shimada, and Akihiko Kikuchi, "Effect of Combination Interlayer on Emission Properties of Phosphorescent Inorganic-organic Hybrid Light-emitting Diodes with AZO/Ag/AZO Transparent Cathode", The 4th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2013), P1-41, Kanazawa, Japan, June 17-20, 2013.
- b48. <sup>\*b-ii</sup>蜂屋大樹, 菊池昭彦, "GaN の水素雰囲気異方性熱エッチング特性の評価", 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 29a-G21-11, 神奈川, 2013 年 3 月 27-30 日.
- b49. 石野隼一, 島田雄平, 菊池昭彦, "燐光系無機/有機ハイブリッド LED における Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 中間層と自己配列双極子分子を用いた電子注入特性の改善効果", 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 29a-G13-8, 神奈川, 2013 年 3 月 27-30 日.
- b50. 風間みなみ, 入江崇之, 菊池昭彦, "ナノミスト堆積法 (多電極型静電塗布法) による有機分子成膜特性の基礎的検討", 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 29a-G13-6, 神奈川, 2013 年 3 月 27-30 日.
- b51. 入江崇之, 西大紀, 風間みなみ, 菊池昭彦, "ナノミスト堆積法(多電極型静電塗布法)による低分子  $\alpha$ -NPD 薄膜堆積における基板温度制御効果", 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 29a-G14-3, 神奈川, 2013 年 3 月 27-30 日.
- b52. <sup>\*b-vi, vii</sup>菊池昭彦, 島田雄平, 石野隼一, 喜多諒, "誘電体/金属多層構造透明導電膜を用いた無機/有機複合 LED の作製と評価", IDY2013-1, 映像メディア学会, 情報ディスプレイ研究会, 東京, 2013 年 3 月 15 日. (招待講演)
- b53. <sup>\*b-vi, vii</sup>菊池昭彦, 入江崇之, 西大紀, 風間みなみ, "多電極型静電塗布法を用いた有機光デバイスの作製と評価", H24 理研シンポジウム「塗布型有機電子デバイス開発の新展開」、埼玉県、2012 年 12 月 11 日. (招待講演)
- b54. 白崎慎也, 田仲晃基, 西大紀, 菊池昭彦, "金属/誘電体(Ag/ZnO)多層膜(MDM)透明導電性材料の熱処理効果", 第 73 回応用物理学会学術講演会, 13a-C13-1, 愛媛, 2012 年 9 月 11-14 日.

- b55. 入江崇之, 風間みなみ, 菊池昭彦, "ナノミスト堆積(NMD)法を用いた高分子/低分子積層型 OLED の作製", 第 73 回応用物理学学会学術講演会, 11a-H3-9, 愛媛, 2012 年 9 月 11-14 日.
- b56. 島田雄平, 石野隼一, 喜多諒, 白崎慎也, 菊池昭彦, "MoO<sub>3</sub>/F8BT/ZnO 系無機/有機複合 LED における Mg<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O 中間層と自己配列双極子分子を用いた電子注入特性の改善", 第 73 回応用物理学学会学術講演会, 11a-H3-5, 愛媛, 2012 年 9 月 11-14 日.
- b57. <sup>\*b-vii</sup> T. Irie, M. Kazama, and A. Kikuchi, "Nano-mist deposition (NMD) technique for fabrication of organic light emitting devices", 9th International Conference on Electroluminescence & Organic Optoelectronics (ICEL2012), P-82, Fukuoka, Japan, September 3-7, 2012.
- b58. <sup>\*b-v, b-vi</sup> Yuhei Shimada<sup>1</sup>, Ryo Kita, Junichi Ishino, Shinya Shirasaki, and Akihiko Kikuchi, "Enhanced emission characteristics of MoO<sub>3</sub>/F8BT/ZnO hybrid LED based on ZnO/Ag/ZnO transparent electrode by MgZnO/BA-CH<sub>3</sub> combination interlayer", 9th International Conference on Electroluminescence & Organic Optoelectronics (ICEL2012), P-83, Fukuoka, Japan, September 3-7, 2012.
- b59. T. Irie and A. Kikuchi, "Multi-layered OLED consisted of low- and high-molecular layers fabricated by Nano-Mist Deposition (NMD) technique", KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics, PB29, Miyagi, Japan, August 29-September 1, 2012.
- b60. <sup>\*b-vii</sup> 菊池昭彦, 入江崇之, "ナノミスト堆積 (NMD) 法を用いた有機薄膜の成膜と OLED への応用", 2012-05-OME、電子情報通信学会 有機エレクトロニクス研究会 (OME)、東京、2012 年 5 月 4 日.
- b61. 辻智之, 島田雄平, 入江崇之, 菊池昭彦, "AlGaIn 電子注入層による GaN/F8BT 無機/有機複合 LED の特性改善", 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 18p-F12-3, 東京, 2012 年 3 月 15-18 日.
- b62. 白崎慎也, 赤井寧, 菊池昭彦, "金属/誘電体(Ag/ZnO)多層膜(MDM)透明導電性材料の作製と評価", 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 18p-F6-3, 東京, 2012 年 3 月 15-18 日.
- b63. 赤井寧, 蜂屋大樹, 菊池昭彦, "ゾル-ゲル法による TiO<sub>2</sub> および TiO<sub>2</sub>:Nb 透明導電膜の作製と評価", 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 18a-F6-6, 東京, 2012 年 3 月 15-18 日.
- b64. <sup>\*b-v</sup> 島田雄平, 赤井寧, 白崎慎也, 辻智之, 菊池昭彦, "誘電体/金属多層膜を用いた F8BT/ZnO 系無機/有機複合 LED の作製", 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 17p-F7-17, 東京, 2012 年 3 月 15-18 日.
- b65. <sup>\*b-i</sup> 菊池昭彦, 井上大輔, 山野晃司, 蜂屋大樹, 岸野克巳, "Ti マスク RF-MBE 選択成長法による AlGaIn/GaN ナノウォール FET の作製", 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 16p-F12-2, 早稲田大学、東京、2012 年 3 月.

- b66. 辻智之, 入江崇之, 島田雄平, 菊池昭彦, "Ga<sub>N</sub>/F8BT 無機/有機複合 LED (IO-HyLED) における自己配列双極子分子 (SADM) を用いた電子注入特性の改善", 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 17p-F7-16, 東京, 2012 年 3 月 15-18 日.
- b67. 入江崇之, 辻智彦, 菊池昭彦, "ナノミスト堆積 (NMD) 法による有機薄膜の成膜と OLED の作製", 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 17p-F7-11, 東京, 2012 年 3 月 15-18 日.
- b68. 菊池昭彦, 辻智之, 白崎慎也, 島田雄平, 入江崇之, "ZnO/F8BT 系無機有機複合 LED の動作特性における MgZnO 電子注入層導入効果", 電子情報通信学会 2011 年ソサイエティ大会, C-4-32, 北海道, 2011 年 9 月 13-16 日.