

平成 21 年 6 月 2 日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18360169  
 研究課題名(和文) 大口径シリコン基板上的四元混晶窒化ガリウム系発光・電子デバイスに関する研究  
 研究課題名(英文) Study on quaternary GaN-based optoelectronic devices on large diameter Si substrate  
 研究代表者  
 江川 孝志(EGAWA TAKASHI)  
 名古屋工業大学・工学研究科・教授  
 研究者番号：00232934

研究成果の概要：高温成長させて AlGaIn/AlN 中間層と歪超格子を用いて Si 基板上に高品質の GaN 層を総膜厚 6 $\mu$ m まで成長できた。AlN/Si の界面における伝導帯のバンド不連続と価電子帯のバンド不連続はそれぞれ 2.3 $\pm$ 0.4eV、2.8 $\pm$ 0.4eV と求められた。発光波長 310nm 付近の InAlGaIn 量子井戸構造を作製した。InAlGaIn/GaN HEMT ではしきい値電圧が 0.21V のノーマリオフ特性が得られた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2007年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2008年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：半導体デバイス工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：有機金属気相成長法、四元混晶半導体、窒化物半導体、発光ダイオード、量子井戸、フォトルミネッセンス、X線回折、高電子移動度トランジスタ

## 1. 研究開始当初の背景

電子デバイス材料として優れた物性を持つ GaN 系材料を高周波用電子素子に応用しようという研究は、米国の APA オプティクス社を始めとしてコーネル大学、カリフォルニア大学(サンタバーバラ校)及びイリノイ大学等で始められた。日本における GaN 系材料を用いた素子の研究開発は光デバイスが中心であったが、HEMT などの電子デバイスの研究は名古屋工業大学の GaN MESFET の研究を皮切りに、その後、各企業等で行われてきた。従来の研究では、主に 2 インチのサファイア及び SiC 基板上への研究が主流であり、大口

径(4 インチ以上) Si 基板上への GaN 系の発光デバイス及び電子デバイスの研究は、結晶成長が困難(気相反応の制御が困難)であるためほとんど研究されていなかった。

Si 基板上の GaN FET に関しては、江川等により最初に発表された(T. Egawa et al., GaN MESFETs on (111) Si substrate grown by MOCVD, 2000, Electron. Lett., Vol. 36, No. 21, pp. 1816-1818)。この研究を契機として、最近、世界的な規模で AlGaIn/GaN HEMT に関する研究が盛んになってきている。スイッチング素子への応用を考えた場合、InAlGaIn 系 HEMT 構造を用いた閾値電圧が正の

ノーマリオフ型のデバイスを開発する必要がある。

また、我々はSi基板上的InGa<sub>N</sub>系青・緑色のLEDに関して、転位の影響を受けない量子ドット構造の発表を行ってきた(T. Egawa et al., 2005, IEEE Electron Device Lett., Vol. 26, No. 3, pp. 169-171)。今後、InAlGa<sub>N</sub>を用いた高効率の紫外LEDを作製する必要がある。低コストの白色照明用の紫外LED及びノーマリオフ型HEMTを用いた電源用デバイス(スイッチング電源、インバータ、無停電電源)の実現など産業的波及効果を考慮すると大きな期待を持たれている。

## 2. 研究の目的

窒化ガリウム(GaN)系半導体は、その固有の物性定数から紫外、可視領域の発光デバイス及び高出力・高周波用電子デバイス用の材料として大きなポテンシャルを持つため、現在では主にサファイア基板上に成長している。サファイアを基板とした場合、サファイアは絶縁体で放熱性が悪く、成長層に強い内部応力が発生するためピエゾ電荷を制御できず、またデバイスプロセスが複雑なため、GaN半導体が本来有している材料物性に起因したデバイス特性を發揮できない。大口径Si基板上に高品質の組成制御されたInAlGa<sub>N</sub>四元混晶半導体を成長させることによりピエゾ電荷の制御が可能になり、大口径、導電性、放熱特性等のSi基板の持つ特徴を活かした発光デバイス及び電子デバイスを作製できるため、省エネによる環境保全、低コスト化が実現できる。下記の研究項目に取り込む。

- (1) 大口径Si基板上へのヘテロエピタキシャル成長技術の確立
- (2) AlN/Si界面の評価
- (3) InAlGa<sub>N</sub>四元混晶半導体を用いた白色照明用紫外LEDの試作
- (4) スwitching電源用ノーマリオフ型InAlGa<sub>N</sub>/GaN HEMTの試作

## 3. 研究の方法

- (1) 大口径Si基板上へのヘテロエピタキシャル成長技術の確立

従来の低温緩衝層を用いた二段階成長法とは異なり、高温で成長したAlN中間層を用いて4インチ以上の大口径Si基板上に高品質GaN層を成長させ、その上に平坦で急峻なヘテロ界面を持つInAlGa<sub>N</sub>四元混晶半導体量子井戸構造LED及びInAlGa<sub>N</sub>/GaN HEMT構造を作製する。AlN層は絶縁体であるため、デバイス構造に応じたAlN層の特性を活用する(LEDでは量子効果、HEMTではセラミックス的特性)。

①Si上のLEDでは縦方向に電流を流す必要があるため、超薄膜のAlN層を成長させトン

ネル接合を用いて動作電圧を低減させる。

②Si上のHEMT構造では、厚膜の絶縁性AlN層を用いることによりリーク電流を低減させる。

InAlGa<sub>N</sub>量子井戸構造及びInAlGa<sub>N</sub>/GaN HEMT構造は、現有のPL測定装置、X線回折装置、透過型電子顕微鏡を用いて結晶構造解析を行う。二次元電子ガスは、電圧-容量特性からの深さ方向プロファイル、ホール効果から求めた移動度の温度特性から電気伝導の解析を行う。MOCVD法によるGaN層の成長にはアンモニアガスを使用するが、アンモニアは反応性が非常に強いためであり、気相反応が起こり大口径基板上への高品質GaN層の成長は困難である。この気相反応を量子化学論的に解析し、ガスの流速を考慮し気相反応を抑制した分圧制御の大型MOCVD反応炉を開発することにより、生産技術の基盤が確立できる。

### (2) AlN/Si界面の評価

導電性Si基板を用いた発光ダイオードでは、AlN/Si界面にバンドオフセットの差に起因した大きなヘテロ障壁が生じるため、縦方向に電流注入を行った場合、動作電圧が増加するという問題がある。これを解決するには、超薄膜の高品質AlN層をSi基板上に高温成長させ、トンネル接合を作製する必要がある。HEMT構造では横方向に電流を流すため、厚膜の絶縁性AlN層を用いることにより導電性Si基板へのリーク電流を低減させる。下記の評価技術を用いてAlN/Si界面の電氣的及び構造的な評価を行う。

- ①XPS法を用いたAlN/Si界面のバンドオフセットの測定
- ②断面TEM観察によるAlN/Si界面の結晶欠陥の評価

### (3) InAlGa<sub>N</sub>四元混晶半導体を用いた紫外LEDの試作

Si基板上的GaN層の結晶成長は、SiとGaNの物性定数が大きく異なるため、成長したGaN層に高密度の結晶欠陥が発生し、この上に従来のInGa<sub>N</sub>量子井戸構造を成長しても量子井戸層に結晶欠陥が伝播し、非発光再結合中心となりLEDの発光効率を低下させる。本研究では、InAlGa<sub>N</sub>四元混晶半導体を用いることにより、Si上のGaN層に格子整合した無欠陥の量子井戸構造が成長できる。また、従来のInGa<sub>N</sub>量子井戸構造より更なる高効率発光が期待できるInAlGa<sub>N</sub>量子ドット構造の研究を行う。特定のInAlGa<sub>N</sub>成長条件下では、結晶欠陥上に成長しない成長モードがある。Si基板上GaNの結晶欠陥数は1cm<sup>2</sup>あたり10<sup>11</sup>~10<sup>12</sup>個あり、欠陥間の距離と選択成長ファセットの大きさを制御すれば、欠陥数とほぼ同桁数の密度で、数

nm サイズの無欠陥量子ドットの結晶成長が可能である。

(4) スイッチング電源用ノーマリオフ型 InAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTの試作

従来のAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTはサファイア及びSiC基板上に高周波・高出力用デバイスとして研究されてきた。本研究では、大口径Si基板上にInAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT構造の低損失・小型電源(スイッチング電源、汎用インバータ、無停電電源など)用のノーマリオフ型 InAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTを作製する。

4. 研究成果

(1) 大口径 Si 基板上へのヘテロエピタキシャル成長技術の確立

生産・量産技術の研究開発の観点から、本研究では本研究センターの「有機金属気相成長技術(大陽日酸)」寄附研究部門の設備であるMOCVD装置を用いて、図1に示すように4インチSi基板上に従来から使用されている低温成長緩衝層(500°Cで成長したAlN層)及び1180°Cの高温で成長したAlN/AlGa<sub>N</sub>中間層を用いて成長したGa<sub>N</sub>層の表面状態の比較を行った。図2に示すように低温成長緩衝層を用いたGa<sub>N</sub>層の表面は荒れた状態になったが、高温成長AlN/AlGa<sub>N</sub>中間層を用いることによりGa<sub>N</sub>層の表面状態は顕著に改善された。この原因は、高温成長させた中間層が二次元成長するためSi基板表面を被覆することによりSiとGaの反応を抑制したためと考えられる。一方、従来の低温成長緩衝層を用いた場合、表面状態が悪化した原因は、低温成長緩衝層がSi基板上に三次元的に島状成長するためSi基板表面を被覆することができず、その後1000°C以上でGa<sub>N</sub>層を成長する時のGaとSi基板との反応によるものと考えられる。

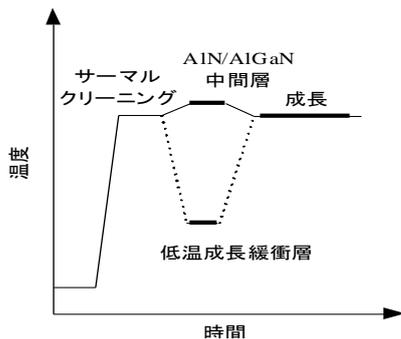
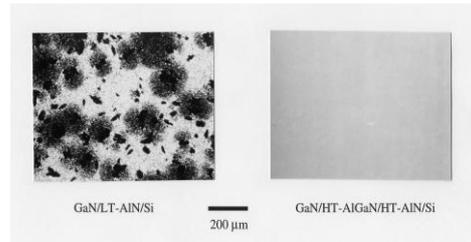


図1 MOCVD法を用いた成長シーケンス

図3に4インチSi基板上のGa<sub>N</sub>/AlN及びAlGa<sub>N</sub>/AlN歪超格子を用いて成長させたGa<sub>N</sub>層の膜厚と反り量の関係を示す。歪超格子を用いた場合、その上に成長するGa<sub>N</sub>層の膜厚により反り量が低減できるとともにクラック発生を防止

することができる。



(a) 従来構 (b) 本研究で提案する構造

図2 Si基板上Ga<sub>N</sub>層表面状態の比較

これは、図4に示すように、Ga<sub>N</sub>層膜厚が薄い領域ではGa<sub>N</sub>の歪は圧縮歪であり、膜厚の増加に伴い引張り歪に変化しており、多層膜とGa<sub>N</sub>の格子定数差に起因した圧縮歪が熱膨張係数差に起因した引張り歪を補償したことで、Ga<sub>N</sub>層膜厚の増加に対して反りの増加が鈍る領域が現れたためと考えられる。この歪超格子を最適化することにより、現在では4インチSi基板上に総膜厚6μmのGa<sub>N</sub>層をクラックフリーで成長できるようになった。

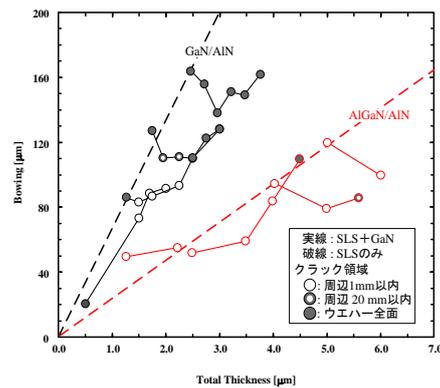


図3 4インチSi基板上のAlGa<sub>N</sub>/AlN歪超格子及びGa<sub>N</sub>層の膜厚と反り量の関係

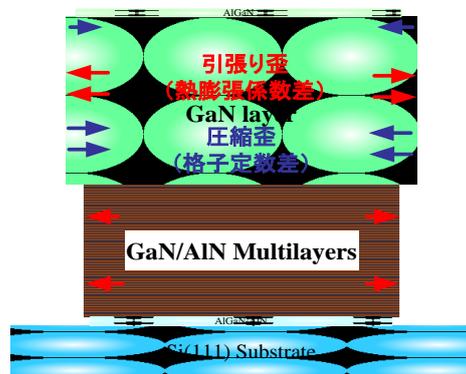


図4 歪超格子を用いたSi基板上のAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>ヘテロ構造の歪の関係

## (2) AlN/Si 界面の評価

Si 基板上 GaN 系 LED は直列抵抗が高く、動作電圧も 10V 近くと極めて高いのでこの原因を確認するために X 線電子分光 (XPS) 法を用いて AlN と Si の界面のエネルギーバンド不連続を調べた。また、種々の構造の LED についてその特性を測定した。Si 基板上の LED の動作電圧は AlN の膜厚が厚い場合、7-10V 程度と非常に高いが、AlN を 3nm と薄くすることにより動作電圧を 4.1V (@ 20mA) にまで低減できた。図 5 は XPS 法で求めた AlN/Si の界面におけるエネルギーバンド図である。伝導帯のバンド不連続  $\Delta E_c$  と価電子帯のバンド不連続  $\Delta E_v$  はそれぞれ  $2.3 \pm 0.4$  eV、 $2.8 \pm 0.4$  eV と求められた。この大きなバンド不連続が LED の高い動作電圧の原因である。

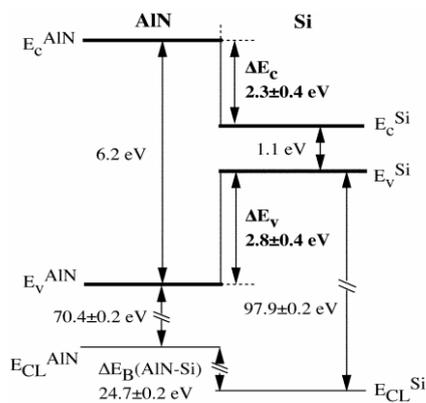


図 5 AlN/Si 界面におけるエネルギーバンドの模式図

## (3) InAlGaN 四元混晶半導体を用いた白色照明用紫外 LED の試作

成長用基板には 2 インチ基板を用いて、MOCVD 装置により成長を行った。サンプルは、サーマルクリーニングを行った後、基板上に低温バッファ層、ノンドープ GaN 層、InAlGaN 発光層を順次成長させた。発光層は 3 周期の量子井戸構造で、障壁層を 10nm と固定し、井戸層を 1、1.5、2、2.5nm と変化させた。障壁層には組成波長 300nm の  $\text{In}_{0.02}\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$  層を、井戸層には組成波長 349nm の  $\text{In}_{0.02}\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  層を用いた。ここで、各 InAlGaN 層の組成は電子プローブマイクロアナライザーにより決定した。作製したサンプルは、XRD 測定および PL 測定を行った。PL 測定は、5K から室温までの温度依存性を調べることにより、詳細に評価した。

図 6 に XRD 測定による omega-2theta スキャンの測定結果を示す。各発光層ともサテライトピークが観察されていることから、量子井戸構造が周期的に成長していると考えら

れる。また、井戸層幅を変化させることで、サテライトピーク位置が変化している様子が観察できる。これは、障壁層と井戸層間に急峻な界面が形成されていることを示唆している。サテライトピークの解析結果によると、1 周期の平均膜厚は各発光層に対して約 10.8nm、約 11.2nm、約 12.1nm、約 12.3nm と計算された。設計値通りの膜厚で発光層が成長していると考えられる。

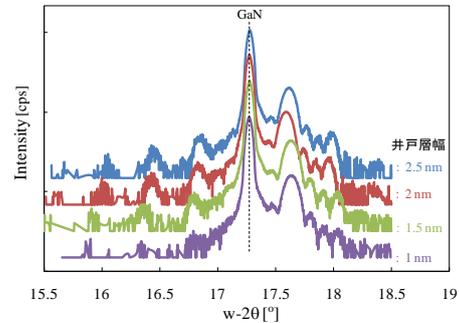


図 6 X 線回折測定結果

図 7 は、室温で測定された各発光層に対する PL ピーク波長を示している。発光層からのシングルピークが観察され、ピーク波長は井戸層幅の増加に伴い、310nm から 334nm まで増加していた。井戸層幅が 2nm のとき、最大発光強度が得られた。

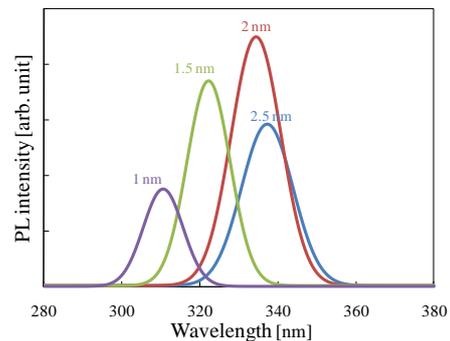


図 7 室温での PL ピーク波長

図 8 に各発光層に対する発光スペクトルの積分強度の温度依存性を示す。積分強度は、5K から 50K までは直線的に減少していき、50K 以上で急激に減少していた。これは、thermal quenching と呼ばれる現象で、非発光再結合中心の温度活性化に起因していると考えられる。この結果から、積分強度比を計算するところにより発光層の内部量子効率が求められる。今回の実験条件では、内部量子効率は 5K および室温で測定された積分強度の比で近似可能である。したがって、各発光層における内部量子効率はおおよそ 25% から 43% と見積もられ、井戸層幅が 2nm のとき、最も高い値を持つことがわかった。

図 9 は、各発光層の発光波長に対するピークエネルギーの温度依存性を示している。井戸層幅が 2nm および 2.5nm の場合、プロット

点が温度の上昇に伴いS字型に変化していることが観察できる。このようなS字変化は、InGa<sub>0.98</sub>N 発光層で見られる現象で、発光層における In 組成の揺らぎによりキャリアが局在化したためである。よって、井戸層幅が 2nm および 2.5nm の場合の InAlGa<sub>0.98</sub>N 発光層が In 局在効果を持つことが示唆された。一方、井戸層幅が 1nm および 1.5nm の場合には、S 字変化は観察されず、プロット点は温度の上昇に伴い単調減少していることがわかる。井戸層幅が減少することで、局在効果が消失もしくは弱められたと考えられる。これは、本実験で用いた発光層の In 組成が低いためであると推察される。

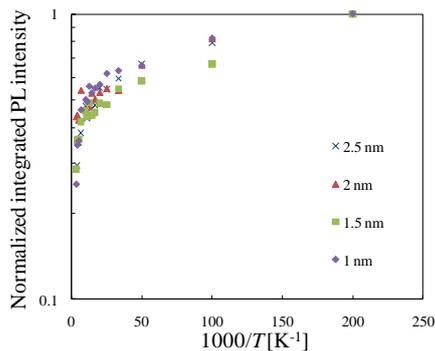


図8 積分強度の温度依存性

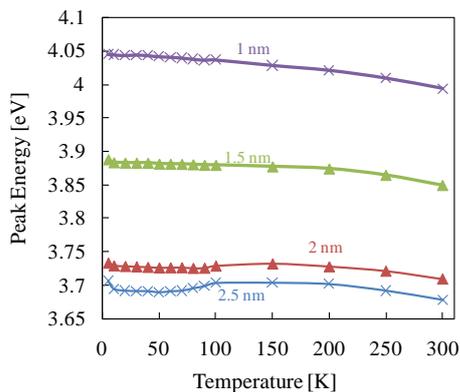


図9 発光波長に対するピークエネルギーの温度依存性

以上の結果から、作製した InAlGa<sub>0.98</sub>N 発光層は急峻な界面を持ち、井戸層幅を変えることで In 局在効果により高い内部量子効率を有する発光層の作製に成功した。

#### (4) スイッチング電源用ノーマリオフ型 InAlGa<sub>0.98</sub>N/GaN HEMT の試作

In<sub>0.02</sub>Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.88</sub>N/GaN HEMT 構造では、二次元電子ガスの移動度が 726 cm<sup>2</sup>/Vs、シートキャリア濃度が 0.2x10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup> が得られた。通常の AlGa<sub>0.98</sub>N/GaN HEMT では、しきい値電圧が -3 V 程度のノーマリオン特性を示すが、ゲート長 : 2 μm、ゲート幅 : 15 μm の In<sub>0.02</sub>Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.88</sub>N/GaN HEMT では、しきい値電圧が 0.21 V と正となり、ノーマリオフ特性

が得られた。最大相互コンダクタンスは 28 mS/mm、最大ドレイン電流は 40 mA/mm であった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

① J. C. Zhang, Y. H. Zhu, T. Egawa, S. Sumita, M. Miyoshi and M. Tanaka, Influence of pulse width on electroluminescence and junction temperature of AlInGa<sub>0.98</sub>N deep ultraviolet light-emitting diodes, Appl. Phys. Lett., Vol. 92, No. 19, pp. 191917-1-191917-3, 2008 年、査読有

② S. Senda, H. Jiang and T. Egawa, AlInN-based ultraviolet photodiode grown by metal organic chemical vapor deposition, Appl. Phys. Lett., Vol. 92, No. 20, pp. 203507-1-203507-3, 2008 年、査読有

③ S. L. Selvaraj, T. Ito, Y. Terada and T. Egawa, AlN/AlGa<sub>0.98</sub>N/GaN MIS-HEMTs with recessed source/drain Ohmic contact, phys. Stat. Sol. (c) 5, No. 9, pp. 2988-2990, 2008 年、査読有

④ T. Ito, M. Yoshikawa, A. Watanabe and T. Egawa, Trap states in n-GaN grown on AlN/sapphire template by MOVPE, phys. Stat. Sol. (c) 5, No. 9, pp. 2998-3000, 2008 年、査読有

⑤ M. Miyoshi, Y. Kuraoka, M. Tanaka and T. Egawa, Metalorganic Chemical Vapor Deposition and Material Characterization of Lattice-Matched InAlN/GaN Two-Dimensional Electron Gas Heterostructures, Applied Physics Express, Vol. 1, No. 8, pp. 081102-1-081102-3, 2008 年、査読有

⑥ K. Orita, Y. Takase, Y. Fukushima, M. Usuda, T. Ueda, S. Takigawa, T. Tanaka, D. Ueda and T. Egawa, Integration of Photonic Crystals on GaN-Based Blue LEDs Using Silicon Mold Substrates, IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 44, No. 10, pp. 984-989, 2008 年、査読有

⑦ T. Ito, Y. Nomura, S. L. Selvaraj and T. Egawa, Comparison of electrical properties in GaN grown on Si(111) and c-sapphire substrate by MOVPE, J. Crystal Growth, Vol. 310, pp. 4896-4899, 2008 年、査読有

⑧ S. L. Selvaraj, T. Ito, Y. Terada and T. Egawa, AlN/AlGa<sub>0.98</sub>N/GaN metal-insulator-semiconductor high-electron-mobility transistor on 4 in.

silicon substrate for high breakdown characteristics, Appl. Phys. Lett., Vol. 90, No. 17, pp. 173506-1-173506-3, 2007年、査読有

⑨J. C. Zhang, Y. H. Zhu, T. Egawa, S. Sumiya, M. Miyoshi and M. Tanaka, Quantum-well and localized state emissions in AlInGaN deep ultraviolet light-emitting diodes, Appl. Phys. Lett., Vol. 91, No. 22, pp. 221906-1-221906-3, 2007年、査読有

⑩A. Ubukata, K. Ikenaga, N. Akutsu, A. Yamaguchi, K. Matsumoto, T. Yamazaki and T. Egawa, GaN growth on 150-mm-diameter (111) Si substrates, J. Crystal Growth, Vol. 298, pp. 198-201, 2007年、査読有

⑪Y. Liu, H. Jiang, T. Egawa, B. Zhang and H. Ishikawa, Al composition dependent properties of quaternary AlInGaN Schottky diodes, J. Appl. Phys., Vol. 99, No. 12, pp. 123702-1-123702-7, 2006年、査読有

⑫Y. Liu, T. Egawa, H. Jiang, B. Zhang and H. Ishikawa, Novel Quaternary AlInGaN/GaN Heterostructure Field Effect Transistors on Sapphire Substrate, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 45, No. 7, pp. 5728-5731, 2006年、査読有

⑬S. L. Selvaraj and T. Egawa, Enhancement of drain current density by inserting 3 nm Al layer in the gate of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors on 4 in. silicon, Appl. Phys. Lett., Vol. 89, No. 19, pp. 193508-1-193508-3, 2006年、査読有

[学会発表] (計4件)

①T. Egawa, GaN-Based LEDs Grown on Si by MOCVD, Materials research society (MRS) spring meeting, 2008年3月26日、サンフランシスコ

② T. Egawa, Present status of MQW InGaIn-based LED on Si substrate, First International Conference on White LEDs and Solid State Lighting, 2007年11月28日、東京

③ T. Egawa, Highly Efficient GaN-Based LEDs with Photonic Crystals Replicated from Patterned Si Substrates, 2006 IEEE International Electron Devices Meeting, 2006年12月13日、サンフランシスコ

④T. Egawa, Realization of normally-off quaternary AlInGaIn/GaN HEMT on sapphire substrate, International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2006) (2006年10月23日、京都)

[図書] (計1件)

①江川孝志他 26名、シーエムシー出版、高周波半導体材料・デバイスの新展開、2006年、pp. 99-107

[産業財産権]

○出願状況 (計3件)

名称：半導体装置およびその製造方法  
発明者：江川孝志、山本信幸、杉本重幸  
権利者：国立大学法人 名古屋工業大学、中部電力株式会社  
種類：特許権  
番号：特願 2008-178786  
出願年月日：平成 20 年 7 月 9 日  
国内外の別：日本

名称：発光素子  
発明者：江川孝志、角谷茂明、柴田智彦、三好実人、田中光浩  
権利者：国立大学法人 名古屋工業大学、日本ガイシ (株)  
種類：特許権  
番号：特願 2007-002511  
出願年月日：平成 19 年 1 月 10 日  
国内外の別：日本

名称：発光素子  
発明者：江川孝志、伊藤統夫  
権利者：国立大学法人 名古屋工業大学、同和鉱業 (株)  
種類：特許権  
番号：特願 2006-209136  
出願年月日：平成 18 年 7 月 31 日  
国内外の別：日本

○取得状況 (計0件)

なし

[その他]

ホームページ  
[http://www.nitech.ac.jp/gene\\_inf/g60/g60\\_050/RENDES.html](http://www.nitech.ac.jp/gene_inf/g60/g60_050/RENDES.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江川 孝志 (EGAWA TAKASHI)  
名古屋工業大学・工学研究科・教授  
研究者番号：00232934

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

神保 孝志 (JIMBO TAKASHI)  
名古屋工業大学・工学研究科・教授  
研究者番号：80093087  
石川 博康 (ISHIKAWA HIROYASU)  
名古屋工業大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：20303696