

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26286045

研究課題名(和文) ワイドギャップ半導体における正孔注入手法の革新と新規発光素子への展開

研究課題名(英文) Novel approaches for hole injections in widegap semiconductors and their applications to novel light-emitting devices

研究代表者

竹内 哲也 (Takeuchi, Tetsuya)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：10583817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：ワイドギャップ窒化物半導体p層の課題である高抵抗・低正孔濃度を解決するために、トンネル接合、分極ドーピング、価電子帯制御の三つの新規手法を提案し、新規発光素子への応用を検証した。その結果、MOVPE法により世界で最も抵抗の低いトンネル接合を実現し、電流狭窄マイクロLEDを実現した。さらに、分極ドーピングにより、高Al組成窒化物半導体において高キャリア濃度( $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上)を実現し、縦方向に電流が流れる深紫外LEDや紫外面発光レーザーを実現した。

研究成果の概要(英文)：In order to solve high resistivity and low hole concentration in p-type widegap nitride-based semiconductors, we proposed three novel approaches, such as tunnel junctions, polarization doping, and valence band control, and developed the approaches in novel optoelectronic devices. As a result, the lowest resistive MOCVD-grown tunnel junction has been achieved and utilized in current confined micro LED. In addition, high carrier concentrations (over  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) in high Al content nitride-based semiconductors have been obtained by polarization doping. Deep ultraviolet LEDs and VCSELs with vertical current injections have been demonstrated by the polarization doping.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：ワイドギャップ半導体 窒化物半導体 p型 分極ドーピング トンネル接合 光デバイス

## 1. 研究開始当初の背景

窒化物半導体をはじめとするワイドギャップ半導体は、可視域から深紫外域までカバーする発光ダイオード、半導体レーザー、そして太陽電池など様々な応用が期待される究極の半導体材料である。しかしながら、ワイドギャップ半導体は、大きなアクセプタイオン化エネルギー (0.1~0.6eV) により、十分な正孔濃度が得られない ( $\sim 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  以下)。その結果、p 型層の抵抗は n 型層の 100~1000 倍と極めて高く、素子構造において不十分な正孔注入や、素子抵抗の大幅な増大が生じ、本来の素子特性が得られていない。

本研究では、このワイドギャップ半導体 p 型層の本質的な課題に対して、(1)トンネル接合、(2)巨大分極利用、(3)価電子帯制御による三つの新規正孔注入手法を検討した。

## 2. 研究の目的

窒化物半導体 p 層の課題である高抵抗・低正孔濃度を解決するために、上述した三つの新規手法を確立する。さらに、その手法を新規発光素子である、紫外面発光レーザーや深紫外発光ダイオードに展開する。具体的には、以下の4点を明らかにする。

- (1)トンネル接合を紫外発光素子に適用し、素子抵抗の低下を実現する。
- (2)巨大分極による正孔生成手法を、p 型層に適用し、電流注入効率の改善とコンタクト抵抗の改善を実現する。
- (3)GaNSb に Mg を添加して高 ( $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  以上) 正孔濃度を実現する。
- (4)上記(1)(2)(3)において確立された手法を適用して、紫外面発光レーザーや、高効率深紫外発光ダイオードを実現する。

## 3. 研究の方法

### (1)紫外発光素子用トンネル接合の低抵抗化

低抵抗紫外発光素子用トンネル接合を実現するために、既存の GaInN トンネル接合をベースにさらなる低抵抗化と構成材料のワイドギャップ化を検討した。具体的には、

- ・組成傾斜層の利用
- ・界面の酸素ドーブ
- ・GaN/AlGaIn トンネル接合

の三項目を検討した。

### (2)巨大分極による正孔生成

GaN よりワイドギャップ材料である、AlN テンプレート上 AlGaIn 構造に関して、急峻な界面への正孔蓄積と組成傾斜界面への三次元正孔蓄積を検討した。

### (3)p 型 (Al) GaNSb 層

GaNSb への Mg 添加を行い、正孔濃度の増大の可能性を検証した。さらにワイドギャップ AlN への Sb 添加を検討した。

### (4)新規正孔注入手法による発光素子

上記(1)で得られた低抵抗トンネル接合を用

いて、電流狭窄構造を有する LED を実証する。さらに、(2)で得られた GaN/AlInN 界面の影響を考慮した導電性 AlInN/GaN 多層膜反射鏡を有する面発光レーザーを実証する。さらに、組成傾斜 AlGaIn 正孔蓄積層を利用した深紫外 LED を実証する。

## 4. 研究成果

### (1)紫外発光素子用トンネル接合の低抵抗化

- ・組成傾斜層の利用

InN モル分率 35%以上の場合、従来の p コンタクトと同等の駆動電圧まで低減することが分かった。ただし、高電流密度域では、数 V 駆動電圧が高いことが判明した。トンネル後の電子や正孔がその隣に存在する n 層や p 層へ移動する際に、ヘテロ界面のポテンシャル障壁により高抵抗化している可能性が理論検討により示唆された。そこで、GaInN/GaN 界面への組成傾斜層導入を検討した。理論検討では界面ポテンシャル障壁が消失した滑らかなプロファイルが示唆された。

次に、組成傾斜 GaInN 層を p 側のみ、n 側のみ、そして両側に設けたトンネル接合と、従来の急峻な界面を有するトンネル接合の計 4 サンプルを作製し、その高電流密度域における I-V 特性を評価した。その結果、図 1 が示すように、組成傾斜を有するトンネル接合は、いずれも低い駆動電圧を示し、さらに、従来の p コンタクトを有する LED と比較しても、同等の低い抵抗を示すトンネル接合が得られたことがわかった。

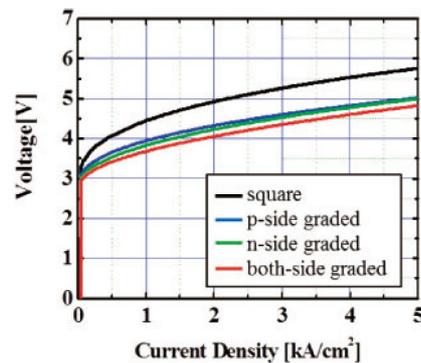


図 1 組成傾斜 GaInN トンネル接合の I-V 特性

- ・界面の酸素ドーブ

次に、GaN よりもバンドギャップの大きい GaN によるトンネル接合を検討した。従来、GaN では低抵抗トンネル接合が得られていなかった。最近、MBE 法にてトンネル接合の界面に成長中断を施して界面に酸素を導入することで GaN トンネル接合が低抵抗化されることが報告された。本研究でも、GaN トンネル接合界面に意図的に酸素を導入させ、低抵抗化する可能性を検討した。通常の成長中断がないもの、成長中断のみを設けたもの、その成長中断に加え、成長中断界面を意図的に

酸化させたもの、さらにその酸化させた試料において、トンネル接合 p 層の Mg 濃度を増大させたものの 4 種類を用意した。図 2 に、上記 4 つの試料の I-V 特性を示す。成長中断を設け、かつ意図的に酸化させ、さらに Mg 濃度を増やした試料が最も低抵抗化することが判明した。

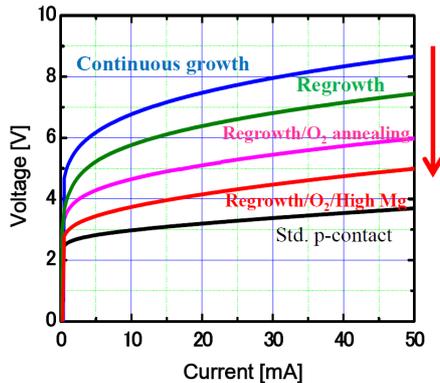


図 2 GaN トンネル接合の I-V 特性

・ GaN/AlGaIn トンネル接合

ワイドギャップ材料でトンネル接合を形成する場合、GaN ではなく  $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$  が主要な構成材料になる。ここでは、狭バンドギャップ GaInN に相当する層として、GaN を選択し、 $\text{GaN}/\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$  トンネル接合構造を検討した。

本検討で行った成長条件範囲内では、良好な  $\text{GaN}/\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$  界面が得られなかった。GaN では  $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$  に対して格子不整合が大きすぎるのが要因のひとつと考えられる。

(2) 巨大分極による正孔生成

AlN テンプレート上 AlGaIn の界面への正孔蓄積を検討するために、二種類の試料を用意した。ひとつは急峻な  $\text{GaN}/\text{AlGaIn}$  界面を有し、もうひとつは組成傾斜させた緩やかな  $\text{GaN}/\text{AlGaIn}$  界面を有する。組成傾斜試料では組成傾斜層に三次元的に正孔が蓄積することが予想される。

この二種類の試料のシートキャリア濃度の温度依存性を図 3 に示す。急峻な  $\text{GaN}/\text{AlGaIn}$  界面を有する試料では、ほとんど温度依存性なく正孔が蓄積する（上図、赤点）一方、組成傾斜  $\text{GaN}/\text{AlGaIn}$  界面を有する試料では予想に反し、電子が蓄積する（下図）ことが判明した。

この原因を調べるために、各試料の格子緩和の状況を測定した。その結果、急峻な界面を有する試料では GaN は完全に緩和していることがわかった。一方、組成傾斜層を有する試料では、 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  までは、下地の  $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$  にコヒーレントに成長するが、それ以降の組成傾斜領域では次第に緩和し始め、最表面に存在する GaN 層は完全に緩和していることがわかった。

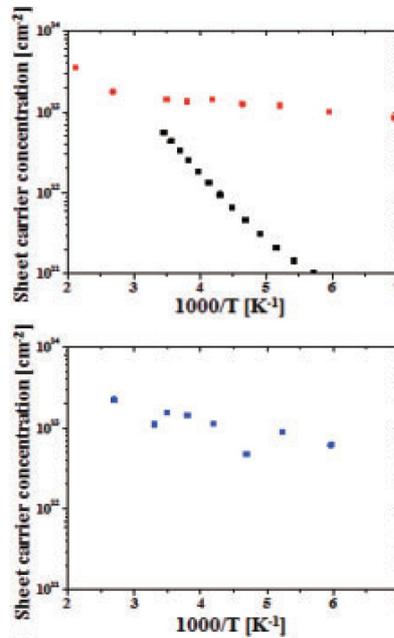


図 3 GaN/AlGaIn 構造シートキャリア濃度の温度依存性

この緩和の状況を踏まえて、組成傾斜層内の各位置(各組成)における「仮想的な」界面に生じる分極電荷密度を算出すると、図 4(a)のようになることがわかった。すなわち、 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  まではコヒーレントに成長しているため、歪を考慮した分極電荷密度の直線に沿って、左上がりの傾きを示す。一方で、 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  以下の層では、「次第に」緩和することから、最表面の完全に緩和した GaN の分極電荷密度の値に緩やかに変化し、その結果、左下がりの傾きを示す。この結果から、分極電荷密度の差分、すなわち、その位置に差分として存在する正味の分極電荷密度を計算すると、図 4(b)のように、コヒーレントに成長している領域では負の分極電荷密度が生じる。ところが、次第に緩和している領域では、緩和した値に近づくため、結果として、正の分極電荷密度が生じ、電子が蓄積することが理論的に予想された。理論的には、約  $3.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  の電子濃度が 30nm 存在していることから、測定されるシート濃度に変換すると約  $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$  に相当する。図 3 下段が示すように、確かに測定値も同様の値になっている。

以上の測定結果、および理論検証により、この緩和した層では、正の分極が誘起し、電子が蓄積してしまうことが示唆された。そこで、この緩和層に、分極電荷濃度以上の Mg 濃度を添加した組成傾斜 AlGaIn 層を作製し、ホール測定を行ったところ、理論的に予想される値 ( $2.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ ) に近い値が室温で得られた。これは、緩和した表面側が p 型化したために、奥の基板側に存在する高濃度の正孔も測定されるようになったことを示しており、将来的な縦方向電流注入の可能性を示唆する結果となった。一方で、250K 以下の低温では n 型に変わってしまうことも観測され

たが、その原因は不明である。

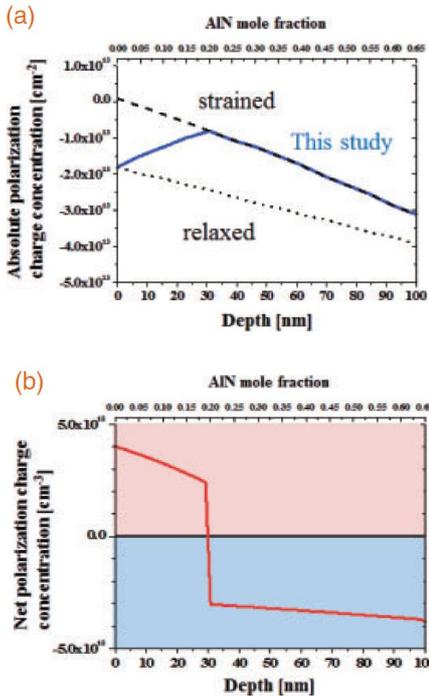


図4 組成傾斜AlGaIn層内の(a)全ての分極電荷密度と(b)正味の分極電荷密度の計算値

### (3) p型(AI)GaNSb層

これまで、GaNSbでは最大で0.5%のSb組成であったが、成長温度を750℃まで下げることによって1.0%まで実現した。しかしながら、これ以上のSb組成を実現するのは困難であった。また、AlNへのSb添加を試みた結果も同様であり、約1%のSb組成であった。GaNSbで見られたような表面平坦性の効果は観測されなかった。

上記約1%Sb組成のGaNSbへMg添加を試みたが、全てn型を示した。Sb取り込みに併せて酸素が混入し、その濃度に等しい電子濃度が生じることがわかった。酸素混入の要因は不明であるが、現状、GaNSbのp型化は困難であると判断した。

### (4) 新規正孔注入手法による発光素子

上記(1)トンネル接合、そして(2)分極ドーピングでそれぞれ確立した正孔注入手法を発光素子に適用し、その効果を検証した。以下に、三つの例を記載する。

・埋め込みトンネル接合による電流狭窄構造を有するLED

トンネル接合までエピタキシャル成長を終えた後、フォトリソグラフィによるパターニングとドライエッチングにより8~20μm径のトンネル接合メサを形成した。その後、再度結晶成長を行って、トンネル接合メサをn-GaNで埋め込んだ。電流注入により発光している近視野像を図5に示す。

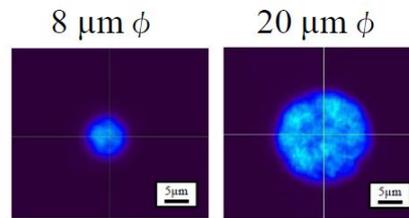


図5 埋め込みトンネル接合LEDの近視野像

トンネル接合が存在している箇所のみで発光している、すなわち電流が狭窄されていることがわかる。I-V特性からは、従来のITO電極を利用したpコンタクトに比べ、約1V程度高い駆動電圧を示すことがわかった。一方で、電流注入開始直後から発光が観測でき、リーク電流のない良好な電流狭窄構造が実現していたことから、今後は、駆動電圧の低下を実現し、面発光レーザに適用すれば、その低光損失による低しきい値・高スロープ効率の実現が期待される。

・巨大分極による正孔生成

次に、AlNテンプレート上に組成傾斜AlGaIn正孔蓄積層を利用した深紫外LEDを作製した。AlGaIn量子井戸までは従来と同様であるが、p層に上述した組成傾斜AlGaIn層を用いている。緩和による電子蓄積を抑制するため、上述したMg添加も行った。

図6にI-L特性を示す。電流注入を増大させるに従って、発光強度が増大することから、組成傾斜層内において正孔が縦方向に伝導し、活性層に注入できていると思われる。一方で、発光スペクトルを測定すると、AlGaIn量子井戸からの270nm発光以外に、320nmの発光も観測されることから、電子が活性層からオーバーフローしている可能性も示唆される。組成傾斜AlGaIn層とGaNバリア層の界面に正の分極電荷が生じるため電子のオーバーフローを誘発している可能性がある。さらなる検討、最適化が必要である。

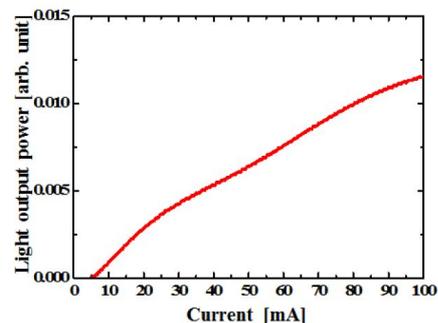


図6 組成傾斜AlGaIn層深紫外発光素子のI-L特性

次に、分極による正孔生成を直接利用した例ではないが、分極の存在を考慮した適切な不純物ドーピングの例を記載する。

面発光レーザでは導電性半導体多層膜反

射鏡が利用できることと縦方向電流注入が可能になり、一波長共振器、横方向均一キャリア注入、そして作製工程の大幅簡略化などの多くのメリットが生まれる。窒化物半導体による多層膜反射鏡として格子整合 AlInN/GaN の組み合わせがあり、研究代表者らはこの組み合わせによる高品質反射鏡を実現した。

この AlInN/GaN 反射鏡に Si を添加して導電性を持たせることが期待される。この多層膜内において、AlInN/GaN 界面には正の分極電荷が誘起し、Si を添加しなくても電子が蓄積し、導電性に寄与する。一方で、GaN/AlInN 界面には負の分極電荷が生成し、電子ではなく正孔が蓄積し、電子伝導にとっては大きな障害となる。そこで、この各界面に発生する分極電荷を考慮して、n 型導電性を得るために添加すべき Si 濃度を算出し、AlInN/GaN 多層膜反射鏡に Si 変調ドーピングを行った。すなわち、図 7 右に示すような、電子が蓄積する AlInN/GaN 界面には低 Si 濃度を、正孔が蓄積してしまう GaN/AlInN 界面には高 Si 濃度を添加する変調ドーピングである。図 7 左に示すような 10 ペアの Si 添加 AlInN/GaN 多層膜構造を作製し、その縦方向電流注入時の I-V 特性を評価した。直線的なオーミック特性が得られた。一方で、変調ドープを施さなかった従来のドーピングではショットキー特性を示した。

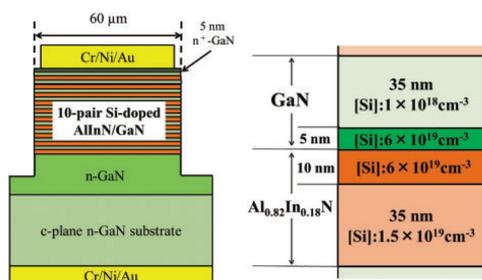


図 7 Si 変調ドーピングを施した AlInN/GaN 多層膜構造

この良好な結果により、変調 Si ドープ AlInN/GaN 多層膜反射鏡を用いた青紫色面発光レーザを試作した。46 ペアの変調 Si ドープ AlInN/GaN 多層膜反射鏡を素子の下部に利用し、上部は誘電体多層膜反射鏡を利用した。本構造では縦方向に電流注入が可能のため、共振器長は 1.5 とこれまで作製された電流注入型 GaN 系面発光レーザとしては最も短い共振器長が可能となった。

この作製した面発光レーザの I-L-V 特性を図 8 に示す。2.6mA 以上で急激な光出力の増加がみられ、同時に、発光スペクトルの狭線化 (0.1nm 以下) も観測されることから、GaN 系面発光レーザにおいて縦型電流注入にて初めてレーザ動作に実現した。なお、この素子の微分抵抗は 250 Ω であり、これは横方向注入の面発光レーザ ( ~ 100 Ω ) に比べると

まだ高い値であり、今後さらなる最適化が必要である。

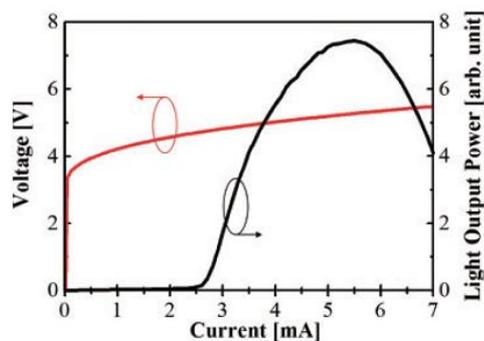


図 8 導電性 AlInN/GaN 多層膜反射鏡を有する青紫色面発光レーザの I-L-V 特性および発光スペクトル

## 5. 主な発表論文等

(雑誌論文) (計 17 件)

1. T. Yasuda, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, I. Akasaki, and H. Amano, Appl. Phys. Express, 10 (2017) 025502-1-4(査読有)
2. S. Katsuno, T. Yasuda, K. Hagiwara, N. Koide, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, I. Akasaki, and H. Amano, Jpn. J. Appl. Phys., 56 (2017) 015504-1-4(査読有)
3. D. Takasuka, Y. Akatsuka, M. Ino, N. Koide, T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama, and I. Akasaki, Appl. Phys. Express, 9 (2016) 081005-1-4(査読有)
4. K. Ikeyama, Y. Kozuka, K. Matsui, S. Yoshida, T. Akagi, Y. Akatsuka, N. Koide, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki, Appl. Phys. Express, 9 (2016) 102101-1-4(査読有)
5. K. Matsui, Y. Kozuka, K. Ikeyama, K. Horikawa, T. Furuta, T. Akagi, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys., 55 (2016) 05FJ08-1-4(査読有)
6. T. Furuta, K. Matsui, K. Horikawa, K. Ikeyama, Y. Kozuka, S. Yoshida, T. Akagi, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys., 55 (2016) 05FJ11-1-4(査読有)
7. S. Yoshida, K. Ikeyama, T. Yasuda, T. Furuta, T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama, and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys., 55 (2016) 05FD10-1-5(査読有)
8. S. Yoshida, K. Ikeyama, T. Yasuda, T. Furuta, T. Takeuchi, M. Iwaya, Satoshi Kamiyama and Isamu Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys., 55 (2016) 05FD10-1-5(査読有)
9. Daisuke Komori, Kaku Takarabe, Tetsuya

- Takeuchi, Takao Miyajima, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki,  
Jpn.J.Appl.Phys,55(2016)05FD01-1-3(査読有)
10. 竹内哲也、岩谷素顕、上山智、赤崎勇、J.Illum.Engng.Inst.Jpn,100(2016)189-192(査読有)
  11. T. Yasuda, K. Hayashi, S. Katsuno, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, I. Akasaki and H. Amano,physica status solidi,212 (2015) 920-924(査読有)
  12. T. Yasuda, K. Hayashi, S. Katsuno, Takarabe, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, I. Akasaki and H. Amano,Physica Status Solidi(a),212(2015)920-924(査読有)
  13. D. Minamikawa, M. Ino,S. Kawai, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya,and I. Akasaki, Physica Status Solidi(b) 252 (2015) 1127-1131(査読有)
  14. D. Minamikawa, D. Takasuka, M. Ino, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, and I. Akasaki, 2014 MRS Fall Meeting Proceeding,1736(2015) mrsf14-1736-t03-04(査読有)
  15. 勝野翔太、林 健人、安田俊輝、岩谷素顕、竹内哲也、上山 智、赤崎 勇、天野 浩、電子情報通信学会技術研究報告、114(2014)75-80(査読無)
  16. 竹内哲也、岩谷素顕、上山 智、赤崎 勇、日本結晶成長学会誌、41(2014)21-32(査読有)
  17. 小森大資、笹島浩希、鈴木智行、竹内哲也、上山 智 岩谷素顕、赤崎 勇、電子情報通信学会技術研究報告、114(2014)7-10(査読無)

〔学会発表〕(計 75 件)

1. K. Matsui, T. Furuta, N. Hayashi, T. Akagi, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, I. Akasaki, EMN Meeting on Epitaxy, 2016/9/6, Budapest, Hungary.
2. 安田俊輝、竹内哲也、岩谷素顕、上山智、赤崎勇、天野浩、第 77 回秋季応用物理学学会学術講演会、2016/9/1、新潟
3. Y. Akatsuka, D. Takasuka, M. Ino, T. Akagi, T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama, and I. Akasaki, The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy, 2016/8/11, nagoya, Japan.
4. K. Matsui, T. Furuta, N. Hayashi, Y. Kozuka, T. Akagi, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki, IEEE Lester Eastman Conference, 2016/8/2, Bethlehem, PA, USA.
5. T. Yasuda, S. Yoshida, T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama, I. Akasaki, and H. Amano, IEEE 2016 Lestar Eastman Conference, 2016/8/1, Bethlehem, USA
6. K. Matsui, T. Furuta, Y. Kozuka, T. Akagi, T.

Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya and I. Akasaki, the Electronic Materials Symposium, 2016/7/6, shiga, Japan.

7. 安田俊輝、勝野翔太、桑原奈津子、竹内哲也、岩谷素顕、上山智、赤崎勇、天野浩、第 35 回電子材料シンポジウム、2016/7/1、滋賀
8. K. Matsui, K. Ikeyama, T. Furuta, Y. Kozuka, T. Akagi, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki, The 4th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications '16, 2016/5/20, Yokohama, Japan.
9. N. Kuwabara, T. Yasuda, S. Katsuno, N. Koide, T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama, and I. Akasaki, LEDIA'16, 2016/5/1, Yokohama, Japan.  
(以下ページの都合上省略)

〔産業財産権〕

出願状況(計 4 件)

1. 名称：窒化物半導体発光素子及びその製造方法、発明者：竹内哲也、小森大資、財部覚、岩谷素顕、赤崎勇、権利者：同上、種類：特許、番号：特願 2015-084802、出願年月日：2015/04/17、国内外の別：国内
2. 名称：窒化物半導体発光素子、発明者：竹内哲也、高須賀大貴、岩谷素顕、赤崎勇、権利者：同上、種類：特許、番号：特願 2016-038890、出願年月日：2016/03/01、国内外の別：国内
3. 名称：窒化物半導体発光素子、発明者：竹内哲也、岩谷素顕、赤崎勇、権利者：名城大学種類：特許、番号：PCT/JP2014/065893、出願年月日：2014/06/16、内外の別：外国
4. 名称：npn 型窒化物半導体発光素子の製造方法、および npn 型窒化物半導体発光素子、発明者：竹内哲也、桑野侑香、岩谷素顕、赤崎勇、権利者：名城大学、種類：特許、番号：PCT/JP2015/054975、出願年月日：2015/02/23、国内外の別：外国

**6 . 研究組織**

(1)研究代表者

竹内 哲也 ( TAKEUCHI, Tetsuya )

名城大・理工学部・教授

研究者番号：10583817

(4)研究協力者

上山 智 ( KAMIYAMA, Satoshi )

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：10340291

岩谷 素顕 ( IWAYA, Motoaki )

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：40367735