

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 20 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560361

研究課題名（和文） プレーナー型集積化 GaN 系面発光素子の製作検討

研究課題名（英文） Fabrication of planar-type GaN-based surface emitting devices

研究代表者

本田 徹 (HONDA TOHRU)

工学院大学・工学部・教授

研究者番号：20251671

研究成果の概要（和文）：小型ディスプレイパネルに要求される GaN(窒化ガリウム)系発光素子は、大面積に配置することが必要であると共に、大幅な低価格化が要求される。そこで、本研究では、基本的な素子構造としてショットキー型構造に着目し、検討した結果、表面改質法としてアルミニウムフェースパック法を用いることにより低コストに素子特性向上が行えることがわかった。また、近紫外透明電極として MgZnO(酸化マグネシウム亜鉛)薄膜を提案し、その製作を行った。

研究成果の概要（英文）：GaN-based light-emitting pixels for the micro displays require the large-scale integration and their cost-effective fabrication. In this study, GaN-based Schottky-type LEDs and their integration were investigated. I found the face-pack process was effective for their reduction of the reverse-bias leakage current. This is also effective for the increase of light-emission efficiency. I have also proposed the MgZnO-based transparent electrode for the light-emitting devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：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：光デバイス・光回路

1. 研究開始当初の背景

窒化ガリウム(GaN)を代表とする III-V 窒化物半導体は、青色・緑色・白色発光ダイオード(LEDs)、400nm 帯半導体レーザー(LDs)に応用されるとともに、電子デバイスへの応用研究も活発に行われている。これら III-V 族窒化物半導体は、近未来の主力半導体となる可能性を秘めている。このような観点から、III-V 窒化物材料の応用の裾野を広げるため、研究代表者らは、III-V 族窒化物半導体を利用した面発光レーザーの製作研究を行ってきた。面発光レーザーは、集積化が容易な半導体レーザーの一形式であり、その製作プロセスは発光ダイオード等の集積化技術と重なるところが大きい。一方、フラットパネル・ディスプレイ(FPDs)の研究・実用化は、近年著しい進展があり、液晶ディスプレイのみならず、プラズマ・ディスプレイ、有機 EL など非常に多様にわたる方式が市場に出ている。屋外大型ディスプレイの分野では、窒化物半導体

用した面発光レーザーの製作研究を行ってきた。面発光レーザーは、集積化が容易な半導体レーザーの一形式であり、その製作プロセスは発光ダイオード等の集積化技術と重なるところが大きい。一方、フラットパネル・ディスプレイ(FPDs)の研究・実用化は、近年著しい進展があり、液晶ディスプレイのみならず、プラズマ・ディスプレイ、有機 EL など非常に多様にわたる方式が市場に出ている。屋外大型ディスプレイの分野では、窒化物半導体

を利用した発光ダイオードによる方法が、大きな市場を獲得している。これは、III-V 族窒化物半導体がディスプレイ応用に適していることを意味する。本研究は、2 インチ程度の家庭・ビジネス用 III-V 族窒化物半導体発光素子を集積利用した FDPs(本申請ではマイクロディスプレイと称する)を実現することが最終目的である。

研究開始当初、20 インチ程度のサイズにおいて 10 ドル程度(約 1,000 円)の価格が一般的なディスプレイに求められている。一方、1024x768 ピクセルの解像度で考えると、LED ディスプレイでは、青色発光ダイオードの値段だけでも 800 万円となる。RGB-LED を用いた FDP を家庭・ビジネス用ディスプレイとして使用するためには 100 分の 1 程度まで 1 ピクセルの価格を低減する必要があり、最大の問題点と考える。これまでに、紫外発光ダイオードの集積化を試みた研究はあるが、従来、LED 単体で使用するためのデバイス構造(以下、ディスクリート LED と称する)を集積化した構造であり、コスト的な観点からマイクロディスプレイへの応用は非常に困難であると考えられる。

2. 研究の目的

フラット・ディスプレイパネルに要求される GaN 系発光素子は、大面積に配置することが必要であることが不可欠であると共に、上記したように大幅な低価格化が要求される。そこで、本研究では、GaN 系集積化 LED を用いたプレーナー型 micro-LED array の製作検討を行った。

3. 研究の方法

発光素子集積化のための縦方向電流注入が要求される。通常 LED は、発光層(活性層)とその周辺(クラッド層)との屈折率差により、薄膜構造と平行に導波される光成分が大きい。これは、各発光素子間の干渉につながる。そこで、屈折率的に 3 次元である発光層の製作を検討した。また、素子の基本的な構造を製作し、将来の集積化への問題点を探すことを目的に GaN の結晶成長電極形成などの検討を行った。

4. 研究成果

プレーナー型 micro-LED の基本的な素子構造としてショットキー型構造に着目して検討を行った結果、発光ダイオードが形成できることはこれまでに報告してきたが、表面改質法としてアルミニウムフェースパック法を用いることにより低コストに素子特性向上が行えることがわかった。また、この形状の場合、基板面を光出射方向とすると、内部吸収により、発光効率が非常に低下することがわかった。ここで、フェースパック法と

は、ショットキー接触する GaN 半導体表面に対する処理方法であり、今回の研究により発見することができた。窒化ガリウムの表面にアルミニウムを蒸着する。この後、大気中で加熱処理する。本処理によりアルミニウムは酸化するが、その際に GaN 表面の貫通転移周りに存在する過剰 Ga がアルミニウム中に拡散する。この周辺は、アルミニウム・ガリウム合金となり、酸化速度がアルミニウムと比較して遅いことがわかった。酸化時間の最適化により、アルミニウム・ガリウム合金が酸化されず、アルミニウムのみが酸化されるように制御し、酸化アルミニウムを緩衝フッ酸溶液(BHF)により除去する。その後、アルミニウム・ガリウム合金を酸化することにより酸化物絶縁体が GaN 貫通転移周りに形成される。この部分はダイオード接合を形成した際に電流が流れないパスとなるため、ダイオード特性が向上した。また、貫通転移周りには非発光中心となる III 族空孔が多く存在すると報告されている。この非発光中心の多い部分にもキャリアが注入されないため、ダイオードの発光効率が向上した。

また、内部吸収低減のためには、ショットキー電極を透明電極とすることが考えられる。そこで、近紫外透明電極として MgZnO(酸化マグネシウム、酸化亜鉛混晶)薄膜を提案し、その製作を行った。製作には低コスト製作が見込まれる分子プレカーサー法を用いた。分子プレカーサー法は、溶液法の一つであり、大気中で扱えることができる金属錯体水溶液をスピコートし、熱分解させることにより酸化物薄膜を得る方法である。その結果、MgZnO における Mg 組成が 10%程度以上にすると、GaN 系発光ダイオード 370nm の発光に対して透明になることがわかった。しかしながら、抵抗率に問題があることがわかった。この抵抗率低減については、

- (1) 残留炭素の影響
- (2) 配向性の影響

が主に考えられる。(1)については、分析の結果 10^{18} cm^{-3} 程度残留していることがわかった。成膜温度を検討し、 10^{17} cm^{-3} 台にすることができたが、透明導電膜としての抵抗率には大きな影響を与えなかった。今後、さらなる検討が必要かもしれない。また、(2)についても検討した。ZnO 系透明電極では、ZnO が六方晶構造を有するため、自発分極を結晶中に内在している。多結晶薄膜では結晶子内に存在する内部電界が、電子の伝導パスに大きな影響を与えるものと考えた。実際に低抵抗 ZnO 透明導電膜は c 軸配向していることが報告されている。本研究では、分子プレカーサー法により c 軸配向 MgZnO 薄膜を製作することを検討した。この結果、有機金属錯体を熱分解させるプロセスにおける雰囲気を変更させることにより c 軸配向を実現させるこ

とができた。Ga 添加により抵抗率を $10^{-2} \Omega$ cm 台まで低減することに成功した。

通常 LED は、発光層(活性層)とその周辺(クラッド層)との屈折率差により、薄膜構造と平行に導波される光成分が大きい。これは、各発光素子間の干渉につながる。そこで、屈折率的に 3 次元である発光層の製作について分子線エピタキシャル成長(MBE)装置を用いて In 拡散による方法で検討した。イオンインプラネーションと比較して低コスト製作が期待できたが、GaN 薄膜製作前に In を蒸着した場合には GaInN の形成が確認できたが GaN 表面からの拡散はうまくいかなかった。そこで、GaInN もしくは InN による数分子層発光層を採用した弱導波路構造の採用を検討した。FDTD による計算結果では、弱導波路構造は、光クロストーク低減に有効であることがわかった。今後、実装した素子を製作してゆくことが必要であると考え。

上の知見を利用して、10 素子程度集積したショットキー型 GaN 系発光ダイオードを製作し、赤・緑・青(RGB)発光素子の製作を試みた。この結果、3 色発光を得ることができた。効率にまだ問題はあがるが、将来、GaN 系集積化発光素子を利用したマイクロディスプレイに前進したと考える。

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 6 件)

- ① Tohru Honda, Naoyuki Sakai, Shigetoshi Komiyama, Masato Hayashi and Tatsuhiko Igaki, "Reduction of reverse-bias leakage current in GaN-based Schottky-type light-emitting diodes by surface modification using the aluminum facepack technique," *Physica Status Solidi (C)*, 査読有, 9 巻, 2012, 778-781.
DOI: 10.1002/pssc.201100387
- ② Takeshi Onuma, Naoyuki Sakai, Takashi Okuhata, Atsushi A. Yamaguchi, and Tohru Honda, "Surface Recombination of hexagonal GaN crystals," *Physica Status Solidi (C)*, 査読有, 8 巻, 2011, 2321-2323.
DOI: 10.1002/pssc.201001013
- ③ H. Nagai, S. Aoyama, H. Hara, C. Mochizuki, I. Takano, T. Honda and M. Sato, "Photoluminescence and photo reactivity affected by oxygen defects in crystal-oriented rutile thin film fabricated by molecular precursor method," *Journal of Materials Science*, 査読有, 45 巻, 2010, 5704-5710.
DOI: 10.1007/s10853-010-4640-z
- ④ T. Honda, T. Oda, Y. Mashiyama, H. Hara

and M. Sato, "Fabrication of c-axis oriented Ga-doped MgZnO-based UV transparent electrodes by molecular precursor method," *Physica Status Solidi (C)*, 査読有, 7 巻, 2010, 2471-2473.

DOI: 10.1002/pssc.200983871

[学会発表] (計 90 件)

- ① M. Hayashi, T. Goto, T. Yamaguchi, T. Igaki, and T. Honda, "Low temperature of GaN on pseudo (111)Al substrates by RF-MBE," *Materials Research Society 2011 Fall Meeting (MRS 2011F)*, Boston, MA, USA, O7.40, 2012.12.
- ② Y. Sugiura, T. Oda, T. Onuma, T. Yamaguchi, and T. Honda, "In-plane epitaxial relationship of (0001) sapphire grown by compound-source MBE," *Materials Research Society 2011 Fall Meeting (MRS 2011F)*, Boston, MA, USA, M13.16, 2011.11.
- ③ T. Oda, H. Hara, Y. Sugiura, T. Yasuno, T. Yamaguchi, M. Sato, and T. Honda, "Ozone treatment of the substrates for the ZnO deposition by molecular precursor method," *The 10th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-10)*, BUCT, Beijing, China, A3, 2011.11.
- ④ R. Amiya, Y. Sugiura, T. Yamaguchi and T. Honda, "X-ray diffraction pattern of ZnO layer grown by compound source MBE," *The 10th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-10)*, BUCT, Beijing, China, A2, 2011.11.
- ⑤ T. Honda, "XPS spectra of c-face GaN and ZnO crystals," *The 10th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-10)*, BUCT, Beijing, China, O1, 2011.11.
- ⑥ T. Honda, T. Igaki, T. Yamaguchi, Y. Kumagai and A. Koukitu, "Built-in potential along the C-axis in MBE-grown GaN layers observed by angle resolved X-ray photoelectron spectroscopy," *The 28th North American Conference on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE 2011)*, San Diego, California, USA, P20, 2011.8.
- ⑦ T. Yamaguchi, T. Araki, T. Honda, E. Yoon and Y. Nanishi, "Growths of InN/InGaN Pariodic Structure and Thick InGaN film using dropment elimination process by radical-beam irradiation," *The 28th North American Conference on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE 2011)*, San Diego, California, USA, Tu1045, 2011.8.
- ⑧ T. Onuma, N. Sakai, T. Igaki, T. Yamaguchi, A. A. Yamaguchi and T.

- Honda, ” Comparative Study of Surface recombination in hexagonal GaN and ZnO surfaces,” The 28th North American Conference on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE 2011), San Diego, California, USA, Mo1130, 2011.8.
- ⑨ T. Honda, N. Sakai, S. Komiyama, M. Hayashi and T. Igaki, “Reduction of reverse-bias leakage current in GaN-based Schottky-type light-emitting diodes by a surface modification,” 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS 2011), SECC, Glasgow, Scotland, UK, PF2.13, 2011.7.
- ⑩ T. Honda, M. Hayashi, T. Goto and T. Igaki, “GaN growth on pseudo (111)Al substrates by RF-MBE,” E-MRS ICAM IUMRS 2011 Spring Meeting (E-MRS), Nice, France, 4-4, 2011.5.
- ⑪ T. Oda, T. Kidu, H. Hara, Y. Sugiura, M. Sato and T. Honda, “Fabrication of c-axis oriented MgZnO transparent electrodes by molecular precursor method,” The 38th Conference on the Physics and Chemistry of Surfaces and Interfaces (PCSI-38), San Diego, California, USA, We 1200, 2011.1.
- ⑫ T. Honda, T. Igaki, Y. Kumagai and A. Koukitu, “Built-in potential in GaN crystals by angle resolved X-ray photoelectron spectroscopy,” The 38th Conference on the Physics and Chemistry of Surfaces and Interfaces (PCSI-38), San Diego, California, USA, Mo 1220, 2011.1.
- ⑬ N. Sakai, T. Onuma, T. Okuhata, A. A. Yamaguchi and T. Honda, “Surface recombination of hexagonal GaN crystals,” The International Workshop on Nitride semiconductors (IWN2010), Marriott Tampa Waterside Hotel & Marina, Tampa Bay, Florida, USA, GP 1.20, 2010.9.
- ⑭ T. Goto, M. Hayashi, T. Igaki, S. Taguchi and T. Honda, “GaN growth on pseudo Al substrates by molecular beam epitaxy at low temperatures,” 16th International Conference on molecular beam epitaxy (ICMBE 2010), bcc Belriner congress center, Belrin, Germany, P 2.21, 2010.8.
- ⑮ T. Honda, K. Noguchi, N. Sakai, S. Taguchi, T. Goto, T. Igaki and M. Hayashi, “XPS study on (0001) and (000-1)GaN layers on sapphire substrates grown by molecular beam epitaxy,” The 3rd International Symposium on Growth of III-Nitrides, Montpellier Convention Center, Montpellier, France, MoP-38, 2010.7.
- ⑯ T. Honda, N. Sakai and T. Nozaki, “Surface Modification of (0001)GaN and its

application to RGB pixels based on UV Schottky-type LEDs,” 8th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED2010), Peking University, Beijing, China, L-3, 2010.5.

- ⑰ T. Oda, H. Hara, C. Mochizuki, M. Sato and T. Honda, “Fabrication of c-axis oriented MgZnO transparent electrode by molecular precursor method,” 8th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED2010), Peking University, Beijing, China, P16, 2010.5.
- ⑱ T. Igaki, M. Hayashi, T. Goto, S. Taguchi and T. Honda, “Polarity control of (0001)GaN epitaxial layers grown by RF-MBE,” The 37th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2010), Takamatsu Symbol Tower, Kagawa, Japan, FrP-63, 2010.6.
- ⑲ T. Honda, K. Noguchi, Y. Kumagai and A. Koukitu, “Surface analysis of Ga- and N-polar GaN by angle resolved X-ray photoelectron spectroscopy,” The 37th International Conference on Physics and Chemistry of Semiconductor Interfaces (PCSI37), 10-14 January 2010, Santa Fe, New Mexico, USA, We1150, 2010.1.
- ⑳ K. Noguchi, T. Nozaki, N. Sakai, Y. Kumagai, A. Koukitu and T. Honda, “XPS Spectra of (0001) and (000-1)GaN Surfaces,” The 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Jeju, Korea, MPO104, 2009.10.

[図書] (計 1 件)

- ① 長谷川 文夫, 本田 徹, 産業図書出版, 電子デバイスの基礎と応用, 2011, 235.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本田 徹 (HONDA TOHRU)

研究者番号 : 20251671

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし