ZnO ナノワイヤ/GaN ヘテロ LED の作製と発光特性評価

非会員 中村 大輔 (九州大学) 准会員 石田 雄貴 (九州大学) 非会員 鉄山 紀弘 (九州大学)
非会員 東畠 三洋 (九州大学) 専門会員 岡田 龍雄 (九州大学)

Fabrication and Luminescent Properties of ZnO Nanowire/GaN Heterojunction LEDs

Non Member Daisuke Nakamura (Kyushu University), Associate Member Yuki Ishida (Kyushu University),
Non Member Norihiro Tetsuyama (Kyushu University), Non Member Mitsuhiro Higashihata (Kyushu University)
and (Fellow Member) Tatsuo Okada (Kyushu University)

ABSTRACT

Vertically aligned ZnO nanowires were directly grown on a Mg-doped GaN substrate by nanoparticle-assisted pulsed laser deposition (NAPLD) without a catalyst. The photoluminescence of the ZnO nanowires at room temperature shows visible emission, which may be attributed to the point defects in the ZnO. A ZnO nanowire/GaN heterojunction LED was fabricated by preparing an insulating film of SOG (spin-on-glass) and electrodes. Electroluminescence at a wavelength of 500 to 900 nm was observed at room temperature under forward bias.

KEYWORDS : ZnO, nanowires, light-emitting diodes, pulsed-laser deposition

1. はじめに

酸化亜鉛(ZnO)は3.37eVのワイドギャップと60meVと極めて大きな励起子束縛エネルギーを併せもつII-VI族化合物半導体であり、資源的にも豊富で安価であり、生体や環境にも優しいことから、紫外発光材料として注目されている。さらに、ZnOは自己組織化成長の性質を有することから、比較的容易にナノ・マイクロ結晶構造を作り易い特徴をもつ。特に、一次元構造体であるZnOナノワイヤはその特徴的な形状と特性から近年注目されている¹⁾。具体的には、比表面積が大きいことから発光面の増大が期待でき、ナノワイヤ自体が光導波路として機能する点などが挙げられる。そこで、こういったZnOナノ結晶をビルディングブロックとして光電子素子に応用する研究が盛んに行われている²⁾。ZnOナノ結晶の作製法には化学気相成長法³⁾、パルスレーザー堆積法⁴⁾、水熱合成法⁵⁾、といった様々な手法がこれまでに報告されている。一方、我々は、触媒を必要としないナノ微粒子支援レーザー堆積法(NAPLD: Nano-particle assisted pulsed laser deposition)を独自に開発し、これまでに良好な光学特性をもつ垂直配向ZnOナノワイヤの作製に成功している⁶⁾⁷⁾。

ZnOナノワイヤを紫外LED等の光電子素子に応用するにはp型、n型の両タイプが不可欠であるが、ZnOは内在する酸素欠陥などの点欠陥によってn型化しやすく、アクセプタをドーピングしようとしても自己補償効果によりp型化が非常に困難という特性をもつ⁸⁾。これまでにZnO薄膜やナノワイヤのp型化の報告がされているものの⁹⁾⁻¹³⁾、安定したp型ZnOの作製は非常に困難である。そこで、p-Si¹⁴⁾やp-GaN¹⁵⁾⁻¹⁷⁾といった既存のp型半導体やp型ポリマー¹⁸⁾¹⁹⁾などの材料を用いたヘテロ接合によるLEDの報告が多くなされている。

我々は、これまでに我々が独自に開発してきたNAPLD法にて作製したZnOナノワイヤとp型GaN膜を利用したヘテロ接合LEDを作製し、紫外光領域のEL発光を確認してきた¹⁷⁾。一方で、作製工程の理由によりGaN膜とZnOナノワイヤの接触面が確保できずに発光部が偏る問題が生じていた。そこで、本研究では、p型GaN膜に対してNAPLD法によりZnOナノワイヤを直接成長することでLEDを作製した。その発光特性を評価したのでその結果について報告する。

2. NAPLDによるZnOナノワイヤの作製

図1にNAPLDの実験装置図を示す。Arガスで充填した石英ガラス管チャンバー内にZnO焼結体ターゲット(純度99.99%)を設置し、KrFエキシマレーザー(COMPex Pro 102F, Coherent

図1 NAPLDの実験装置図

Fig.1 Schematic of the experimental setup for synthesis of ZnO nanowires by NAPLD.

Inc.) を繰り返し周波数 20 Hz, フルエンス 1.3 J/cm^2 にてターゲットに集光照射した。このとき, 雰囲気ガス圧力を数 10 kPa 程度とすることでアブレーションにより放出されたターゲット材料はナノ微粒子を形成する。この微粒子が加熱された基板上に堆積することで ZnO ナノワイヤが成長する。実験では, チャンバー内 Ar ガス圧力を 33.3 kPa (ガス流量 20 sccm) とし, 電気炉を用いてチャンバー内を 1173 K まで加熱させた状態にて, ターゲット面から 3cm 離れた位置に設置した p-GaN 膜上にナノ微粒子を堆積させて ZnO ナノワイヤを作製した。堆積時間は 20min. であった。なお, p-GaN 膜はアメリカの TDI 社製の Mg ドープ GaN 膜(サファイア (0001) 基板使用, 膜厚 $2 \mu\text{m}$) を用いた。作製した ZnO ナノワイヤの走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM, VE-7800S, KEYENCE) 画像を図 2 に示す。直径 200~300 nm, 長さ約 800 nm の ZnO ナノワイヤが p-GaN 膜上に垂直成長していることがわかる。図 2 (a) に示す真上からの観察画像においては隣接するナノワイヤ同士が融合している箇所も見られる。作製した ZnO ナノワイヤの X 線回折 (X-Ray Diffraction) 測定結果を図 3 に示す。ZnO(0002), GaN(0002) および基板であるサファイアの Al_2O_3 (0006) の回折ピークが見られ, それ以外のピークはなかったことから GaN 薄膜上に成長した ZnO ナノワイヤは c 軸配向した結晶構造を有していることがわかった。

図 2 作製した ZnO ナノワイヤの SEM 画像(a)真上から, (b)斜めから

Fig. 2 SEM images of ZnO nanowires, (a) top view and (b) tilted view.

図 3 GaN 膜上の ZnO ナノワイヤの XRD スペクトル

Fig. 3 XRD pattern of the ZnO nanowires grown on the GaN film.

図 4 ZnO ナノワイヤの PL スペクトル

Fig. 4 PL spectrum from the ZnO nanowires.

次に, 作製した ZnO ナノワイヤの発光特性を評価した。He-Cd レーザー (IK3301 R-G, KIMMON KOHA Co., Ltd., 325nm) 励起のフォトルミネッセンス (Photoluminescence: PL) を計測した結果を図 4 に示す。ZnO バンド端起因の紫外発光は非常に弱く, 560 nm 付近をピークとした PL スペクトルが計測された。一方, ターゲットに 5 mm 程度近い距離において作製された ZnO ナノワイヤからは 530 nm をピークとする発光が得られた。なお, ピーク強度は同程度であった。一般に ZnO は内因性欠陥により可視域に発光が見られる。その発光は欠陥の種類によって異なり, 発光中心は 400~700nm まで様々な報告がある^{20)~24)}。代表的なものには 510nm 付近を発光中心とする緑白色があり, 蛍光表示管等への応用が有名である。第一原理計算を用いた理論計算による欠陥準位と発光過程の推定²⁵⁾²⁶⁾もなされているものの, 同じ発光中心に対して異なる発光過程が提唱されているなど未解明な点も多い。したがって, PL スペクトルのみから発光に起因する欠陥を特定することは困難ではあるが, 文献に基づいて推測すると今回得られた 530nm 付近および 560nm 付近を中心とする発光はそれぞれ酸素欠陥²¹⁾と格子間亜鉛を起因²³⁾としている可能性がある。これら ZnO の内因性欠陥は作製条件により大きく変化するが, 本実験においてもターゲット-基板間距離の変化により異なる発光中心が得られた。本研究では簡便な手法により ZnO ナノワイヤを GaN 薄膜上に直接成長させることに成功したが, 一定の発光中心を有する発光を得るためには厳密な作製条件の制御が必要であると考えられる。

3. p-GaN/n-ZnO ナノワイヤヘテロ LED の作製

まず, このサンプルに対して, SOG や電極を作製する前にマイクロプローブを用いて I-V 特性を計測した。アノード側のプローブを GaN 薄膜上に接触させ, カソード側のプローブを ZnO ナノワイヤの先端部に接触させて計測した結果を図 5 に示す。先端径 $50 \mu\text{m}$ のマイクロプローブを使用していることから電流値はサブ mA であるものの, -30 V から 30 V の電圧印加に対して整流性を確認した。両極のプローブを GaN 膜あるいは ZnO ナノワイヤに接触させた際にはオーミック特性が得られたことから ZnO ナノワイヤと GaN 膜の境界において pn 接合が形成されていると示唆される。次に, 図 6 に示すように作製した ZnO ナノワイヤ

図5 マイクロプローブを用いた p-GaN/n-ZnO ナノワイヤヘテロ接合部の I-V 特性

Fig. 5 I - V characteristics through the junction between the ZnO nanowires and the p -type GaN thin film using the micro probe.

図6 p-GaN/n-ZnO ナノワイヤヘテロ LED の概略図

Fig. 6 Schematic configuration of the p -GaN/ n -ZnO nanowire hetero-junction LED.

に対して絶縁層となる SOG (spin on glass) をコーティングした。スピナーを用いて 500rpm : 10sec, 1000rpm : 10sec にて SOG 液をコーティングしたのち、80℃ : 1min, 200℃ : 1min, 425℃ : 60min の行程にて焼結し、約 500nm の SOG 膜を作製した。その後、SOG に埋め込まれていないナノワイヤの先端部に電極 (Ag ペースト) をトップコートし、GaN 膜上には Au を真空蒸着することで電極とし、ヘテロ LED を作製した。GaN 膜と ZnO ナノワイヤの接合領域が pn 接合部となり、Au 電極、Ag 電極をそれぞれアノード、カソードとして順バイアスを印加することでキャリアの再結合による発光が期待できる。電極作製後の IV 特性では、-25V 付近にて降伏現象が見られたものの図 5 と同等の整流性が得られ、30V 印加時に約 2mA の電流値であった。したがって、作製したサンプルが LED デバイスとして機能していることを確認した。図 7 には Ag 電極を設けた後に計測したエレクトロルミネッセンス (Electroluminescence: EL) スペクトルを示す。順方向バイアス時のみに発光が見られ、逆方向バイアス時には発光が見られなかった。順方向バイアス時における EL は、PL と同様に紫外発光はなく、750-780 nm をピークとする約 300nm のブロードな波長幅を有する発光が確認された。p-GaN 膜と ZnO ナノワイヤを用いたヘテロ LED に関する文献は複数あるが、EL スペクトルは紫外、緑色、黄色など作製法によって発光波長が異なる¹⁷⁾²⁷⁾²⁸⁾。これらの発光波

図7 順方向バイアス印加時の p-GaN/n-ZnO ナノワイヤヘテロ LED の EL スペクトル

Fig. 7 EL spectra of the p -GaN/ n -ZnO nanowire hetero-junction LED under various forward bias voltages (5, 10, 15, 20, 25, 30 V).

長の違いは、Mg ドープ GaN のアクセプタ準位、および ZnO 中の格子間亜鉛や酸素欠陥によって作られる欠陥準位が影響していると考えられる²⁾。NAPLD で作製した ZnO ナノワイヤを用いたヘテロ LED に関して考察すると、紫外 EL を確認した以前のヘテロ LED の構造では¹⁷⁾、ZnO ナノワイヤ先端部と GaN 膜による pn 接合であったのに対し、今回のヘテロ LED では ZnO ナノワイヤ底部との pn 接合であった。本研究とは異なるが、ナノワイヤの底部には反転分域境界が形成されている報告がある²⁹⁾ことから、先端部に比べて底部には多くの欠陥が存在していると推測される。反転分域境界は ZnO 基板上に成長した ZnO ナノワイヤにも見られることから、格子定数の異なる GaN 膜 (格子ミスマッチ 1.8 %) に作製した ZnO ナノワイヤの底部には多くの欠陥が形成されている可能性がある。

電流値の増加に伴う変化についてはピーク値が約 780 nm から約 750 nm へと短波長側にシフト (ブルーシフト) する結果となった。量子井戸構造の LED においては電流値増加に伴ってピエゾ電界が遮蔽されることで遷移エネルギーが大きくなり、ブルーシフトする現象が見られるが³⁰⁾、量子井戸構造をもたない本研究の LED は、同様な理由であるとは考えにくい。一方、一般的に電流値増加による発熱でバンドギャップナローイングが生じて発光波長のシフトが起こるが³¹⁾、この場合、長波長側へのシフト (レッドシフト) である。しかし、図 7 の結果は短波長側へのシフトであるため熱的な影響によるシフトではないと思われる。本研究で作製したヘテロ接合 LED では、ナノワイヤの底部における反転分域境界の形成により pn 接合部には結晶欠陥が多い一方で、ナノワイヤ底部から離れると欠陥量は減少していると考えられる。高い順方向バイアスを印加することでキャリアが pn 接合部を越えて ZnO 側あるいは GaN 側まで進んだのちに不純物準位と再結合することで発光波長がブルーシフトする報告があることから³²⁾、本研究でも同様の原因によりブルーシフトが生じたと考えられる。電流増加に伴ってわずかながらではあるが発光のブロードニングが生じていることから、pn 接合部における再結合を起因とする発光に加えて ZnO および GaN におけるバンド端発光が重なることでブルーシフトが生じたと推測される。

図8 印加電圧の変化に対する EL の様子の写真

Fig. 8 The photographs of EL emission of the LED under various forward bias voltages.

図8には印加電圧の変化に対する EL を GaN 基板側から観察した写真を示す。印加電圧 10 V から目視でも確認できる発光が見られ、印加電圧の増加に伴い発光量も大きくなっていることがわかる。なお、発光部は Ag ペーストを塗布した部分に対応していた。発光領域を細かく観察すると、点状に発光しており、一つ一つが ZnO ナノワイヤに対応していることが伺える。発光分布が不均一であるのは、ナノワイヤの成長の不均一性と SOG のコーティングの不均一性が考えられる。さらに、Ag ペーストのエッジに発光点が多い傾向にあったことから電極面内の電流密度分布も発光分布の不均一を引き起こす一因であると推測される。さらに、マイクロプローブによる IV 特性において 30V 印加時に約 0.3mA の電流値であったのに対し、電極作製後の電流値はわずか約 2mA の電流値であったことから Ag ペースト電極が ZnO ナノワイヤ先端と良好なコンタクトができていなかったことが考えられる。したがって、電極形状や電極と半導体との接触度について充分な留意が必要と考える。一方、発光している点によって発光色が異なっているようにも見える。そこで、発光している任意の 3 点について顕微鏡を利用して分光計測した結果を図9に示す。Point 2, 3 のスペクトルはピーク位置が明確ではないが、500nm 付近と 700nm 付近のピークが重なったスペクトルであると推測される。各ピークはそれぞれ ZnO の酸素欠陥²¹⁾および格子間酸素²⁴⁾による欠陥準位起因に対応しており、各発光点において欠陥種類が異なる可能性を示唆している。図10には印加電圧に対するこれらの発光ピーク値の変化をプロットしたものを示す。それぞれの輝点によって発光のしきい値が異なり、ピーク値が長波長であるほどしきい値が低いことが確認された。これまでの研究において ZnO ナノワイヤ単体は単結晶から構成されていることが分かっているが³³⁾、図2(a)に示すようにナノワイヤ同士が融合している箇所は結晶粒界が存在していると推測される。結晶粒界の存在によりドナー準位が形成される報告があることから³⁴⁾、単一ナノワイヤと融合したナノワイヤでは形成されるドナー準位が異なり、それが発光スペクトルの違いをもたらした原因ではないかと考えられる。NAPLD では作製条件を制御することで ZnO ナノワイヤの成長密度を制御できることから³⁵⁾、ナノワイヤ同士の融合のないナノワイヤを作製することで発光スペクトルのばらつきを低減できるものとする。

発光波長に関する分析をさらに進めていく必要はあるが、今回、

図9 各輝点における EL スペクトル

Fig.9 EL spectra of the LED at different emission positions.

図10 印加電圧に対する EL 発光ピーク値の変化

Fig. 10 Peak intensities of EL emission at different positions as a function of the forward bias voltage.

GaN 基板上に直接 ZnO ナノワイヤを成長させた簡便かつ pn 接合点の大きなヘテロ LED の作製を実証し、EL 特性を調査した。

まとめ

Mg ドープ GaN 膜に対して NAPLD 法を用いて垂直配向 ZnO ナノワイヤを直接成長させ、SOG を使用したヘテロ LED を作製した。ZnO のバンド端付近の紫外発光はなく、750-780 nm をピークとするブロードな発光が確認された。これは、pn 接合部に生じた欠陥により形成された欠陥準位による再結合発光であると考えられる。過去に報告した NAPLD により作製した ZnO ナノワイヤを用いたヘテロ LED に比べて紫外 EL 発光は得られなかったものの、作製工程の簡便化や発光点の増大において優位な成果が得られた。発光点の均一化については SOG や電極などのデバイス要素作製に依存している可能性があり、作製精度を高めることが課題の一つである。EL スペクトルは、pn 接合部の欠陥準位に大きく依存し、作製したヘテロ LED では発光点によって EL スペクトルの違いが見られたが、作製条件を制御して ZnO ナノワ

イヤを低密度化することで、EL スペクトルのばらつきを低減できると考えられる。以上の結果より、NAPLD を用いた簡便なヘテロ LED の作製を実証した。

本研究の一部は、科学技術振興調整費および科研費(No. 20360142)の助成による。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- (1) Willander, M., Nur, O., Zhao, Q. X., Yang, L. L., Lorenz, M., Cao, B. Q., Zuniga Perez, J., Czekalla, C., Zimmermann, G., Grundmann, M., Bakin, A., Behrends, A., Al-Suleiman, M., El-Shaer, A., Che Mofor, A., Postels, B., Waag, A., Boukos, N., Travlos, A., Kwack, H. S., Guinard, J. and Le Si Gang, D.: Zinc oxide nanorod based photonic devices: recent progress in growth, light emitting diodes and lasers, *Nanotechnology*, Vol.20, p.332001 (2009).
- (2) Choi, Y.-S., Kang, J.-W., Hwang, D.-K. and Park, S.-J.: Recent Advances in ZnO-Based Light-Emitting Diodes, *IEEE Trans. Elec. Devices*, Vol.57, pp.26-41 (2010).
- (3) Lee, W., Jeong, M.-C. and Myoung, J.-M.: Catalyst-free growth of ZnO nanowires by metal-organic chemical vapour deposition (MOCVD) and thermal evaporation, *Acta Materialia*, Vol.52, pp.3949-3957 (2004).
- (4) Chrisey, D. B. and Hubler, G. K.: Pulsed laser Deposition of Thin Films, John Wiley & Sons (1994).
- (5) Vayssieres, L.: Growth of Arrayed Nanorods and Nanowires of ZnO from Aqueous Solutions, *Adv. Mater.*, Vol.15, pp.464-466 (2003).
- (6) Hartanto, A. B., Ning, A., Nakata, Y. and Okada, T.: Growth mechanism of ZnO nanorods from nanoparticles formed in a laser ablation plume, *Appl. Phys. A*, Vol.78, pp.299-301 (2004).
- (7) Guo, R. Q., Nishimura, J., Ueda, M., Higashihata, M., Nakamura, D. and Okada, T.: Vertically aligned growth of ZnO nanonails by nanoparticle-assisted pulsed-laser ablation deposition, *Appl. Phys. A*, Vol.89, pp.141-144 (2007).
- (8) Zhang, S. B., Wei, S. H. and Zunger, A.: A phenomenological model for systematization and prediction of doping limits in II-VI and I-III-VI₂ compounds, *J. Appl. Phys.*, Vol.83, pp.3192-3196 (1998).
- (9) Tsukazaki, A., Ohtomo, A., Onuma, T., Ohtani, M., Makino, T., Sumiya, M., Ohtani, K., Chichibu, S. F., Fuke, S., Segawa, Y., Ohno, H., Koinuma, H. and Kawasaki, M.: Repeated temperature modulation epitaxy for p-type doping and light-emitting diode based on ZnO, *Nature Materials*, Vol.4, pp.42-46 (2004).
- (10) Ryu, Y. R., Lee, T. S. and White, H. W.: Properties of arsenic-doped p-type ZnO grown by hybrid beam deposition, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.83, pp.87-89 (2003).
- (11) Xiang, B., Wang, P., Zhang, X., Dayeh, S. A., Aplin, D. P. R., Soci, C., Yu, D. and Wang, D.: Rational Synthesis of p-Type Zinc Oxide Nanowire Arrays Using Simple Chemical Vapor Deposition, *Nano Lett.*, Vol.7, pp.323-328 (2007).
- (12) Lin, S. S., Hong, J. I., Song, J. H., Zhu, Y., He, H. P., Xu, Z., Wei, Y. G., Ding, Y., Snyder, R. L. and Wang, Z. L.: Phosphorus Doped Zn_{1-x}Mg_xO Nanowire Arrays, *Nano Lett.*, Vol.9, pp.3877-3882 (2009).
- (13) Zhang, J. Y., Zhang, Q. F., Deng, T. S. and Wu, J. L.: Electrically driven ultraviolet lasing behavior from phosphorus-doped p-ZnO nanonail array/n-Si heterojunction, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.95, pp.211107 (2009).
- (14) Kim, D. C., Han, W. S., Cho, H. K., Kong, B. K. and Kim, H. S.: Multidimensional ZnO light-emitting diode structures grown by metal organic chemical vapor deposition on p-Si, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.91, p.231901 (2007).
- (15) Chen, C. H., Chang, S. J., Chang, S. P., Li, M. J., Chen, I. C., Hsueh, T. J. and Hsu, C. L.: Electroluminescence from n-ZnO nanowires/p-GaN heterostructure light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.95, p.223101 (2009).
- (16) Cao, H., Yan, F., Li, J., Zeng, Y. and Wang, J.: Synthesis and characterization of ZnO nanorods and nanoflowers grown on GaN-based LED epiwafer using a solution deposition method, *J. Phys. D*, Vol.40, pp.3654-3659 (2007).
- (17) Guo, R. Q., Nishimura, J., Matsumoto, M., Higashihata, M., Nakamura, D. and Okada, T.: Electroluminescence from ZnO nanowire-based p-GaN/n-ZnO heterojunction light-emitting diodes, *Appl. Phys. B*, Vol.94, pp.33-38 (2009).
- (18) Wadeasa, A., Nur, O. and Willander, M.: The effect of the interlayer design on the electroluminescence and electrical properties of n-ZnO nanorod/p-type blended polymer hybrid light emitting diodes, *Nanotechnology*, Vol.20, p.065710 (2009).
- (19) Huang, Z., Xu, Z., Zhao, S., Li, Y., Zhang, F., Song, L., Wang, Y. and Xu, X.: Organic/inorganic heterostructures for enhanced electroluminescence, *Solid State Commun.*, Vol.142, pp.417-420 (2007).
- (20) Fang, Z., Wang, Y., Xu, D., Tan, Y. and Liu, X.: Blue luminescent center in ZnO films deposited on silicon substrates, *Opt. Mater.*, Vol.26, pp.239-242 (2004).
- (21) Vanheusden, K., Seager, C. H., Warren, W. L., Tallant, D. R. and Voigt, J. A.: Correlation between photoluminescence and oxygen vacancies in ZnO phosphors, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.68, pp.403-405 (1996).
- (22) Liu, M., Kitai, A. H. and Mascher, P.: Point defects and luminescence centres in zinc oxide and zinc oxide doped with manganese, *J. Lumines.*, Vol.54, pp.35-42 (1992).
- (23) Cao, B., Cai, W. and Zeng, H.: Temperature-dependent shifts of three emission bands for ZnO nanoneedle arrays, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.88, p.161101 (2006).
- (24) Cai, J. H., Ni, G., He, G. and Wu, Z. Y.: Red luminescence in ZnO films prepared by a glycol-based Pechini method, *Phys. Lett. A*, Vol.372, pp.4104-4108 (2008).

- (25) Kohan, A. F., Ceder, G., Morgan, D. and Van de Walle, C. G.: First-principles study of native point defects in ZnO, Phys. Rev. B, Vol.61, pp.15019-15027 (2000).
- (26) Zhang, S. B., Wei, S.-H. and Zunger, A.: Intrinsic n-type versus p-type doping asymmetry and the defect physics of ZnO, Phys. Rev. B, Vol.63, p.075205 (2001).
- (27) Park, W. I. and Yi, G. C.: Electroluminescence in n-ZnO nanorod arrays vertically grown on p-GaN, Adv. Mater., Vol.16, pp.87-90 (2004).
- (28) Park, S. H., Kim, S. H. and Han, S. W.: Growth of homoepitaxial ZnO film on ZnO nanorods and light emitting diode applications, Nanotechnology, Vol.18, p.055608 (2007).
- (29) P-Merceroz, G., Thierry, R., Jouneau, P.-H., Ferret, P. and Feuillet, G.: Compared growth mechanisms of Zn-polar ZnO nanowires on O-polar ZnO and on sapphire, Nanotechnology, Vol.23, p.125702 (2012).
- (30) Mukai, T., Yamada, M. and Nakamura, S.: Characteristics of InGaN-Based UV/Blue/Green/Amber/Red Light-Emitting Diodes, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.38, pp.3976-3981 (1999).
- (31) Sheu, J. K., Chang, S. J., Kuo, C. H., Su, Y. K., Wu, L. W., Lin, Y. C., Lai, W. C., Tsai, J. M., Chi, G. C. and Wu, R. K.: White-Light Emission From Near UV InGaN-GaN LED Chip Precoated With Blue/Green/Red Phosphors, IEEE Photonic Tech. Lett., Vol.15, pp.18-20 (2003).
- (32) Zhang, X.-M., Lu, M.-Y., Zhang, Y., Chen, L.-J. and Wang, Z. L.: Fabrication of a High-Brightness Blue-Light-Emitting Diode Using a ZnO-Nanowire Array Grown on p-GaN Thin Film, Adv. Mat., Vol.21, pp.2767-2770 (2009).
- (33) Nakamura, D., Okazaki, K., Palani, I.A., Higashihata, M. and Okada, T.: Influence of Sb on a controlled-growth of aligned ZnO nanowires in nanoparticle-assisted pulsed-laser deposition, Appl. Phys. A, Vol.103, pp.959-963 (2011).
- (34) Cordaro, J. F., Shim, Y. and May, J. E.: Bulk electron traps in zinc oxide varistors, J. Appl. Phys., Vol.60, pp.4186-4190 (1986).
- (35) Guo, R., Nishimura, J., Matsumoto, M., Nakamura, D. and Okada, T.: Density-Controlled Growth of ZnO Nanowires via Nanoparticle-Assisted Pulsed-Laser Deposition and Their Optical Properties, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.47, pp.741-745 (2008).

(受付日 2012 年 11 月 22 日/採録日 2013 年 9 月 3 日)

中村大輔 (非会員)

九州大学大学院システム情報科学研究院

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

平成 16 年九州大学大学院システム情報科学府修士課程修了。平成 18 年同大学院システム情報科学研究院助手。平成 22 年同准教授。博士 (工学)。応用物理学会, IEEE, SPIE 各会員。

石田雄貴 (准会員)

九州大学大学院システム情報科学府

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

平成 25 年九州大学大学院システム情報科学府修士課程電気電子工学専攻修了。修士 (工学)。現在 TPEC 勤務。在学中 ZnO ナノ結晶を用いたヘテロ LED の作製に関する研究に従事。

鉄山紀弘 (非会員)

九州大学大学院システム情報科学府

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

平成 24 年九州大学工学部電気情報工学科卒。現在, 同大学院システム情報科学府修士課程電気電子工学専攻在学中。ZnO ナノ結晶を用いたヘテロ LED の作製と発光特性評価に従事。

東畠三洋 (非会員)

九州大学大学院システム情報科学研究院

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

平成 6 年 4 月九州大学工学部採用。その後, 同大学院システム情報科学府に在籍。可変波長レーザー, 広帯域レーザー, 紫外レーザーの開発とその応用研究に従事。応用物理学会会員。

岡田龍雄 (専門会員)

九州大学大学院システム情報科学研究院

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

昭和 54 年九州大学大学院博士課程単位取得退学。同大学院総合理工学研究科助手, 講師, 助教授, 工学部助教授を経て平成 8 年同大学院システム情報科学研究院教授。工学博士。照明学会会員。