

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：54101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K02995

研究課題名(和文) 半導体発光デバイス作製実験教材の開発と実践的な教育への応用

研究課題名(英文) Development and application of an educational resource of light-emitting semiconductor device fabrication

研究代表者

辻 琢人(TSUJI, Takuto)

鈴鹿工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：70321502

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：半導体発光デバイスの作製技術と動作原理を理論と実践の両面から習得することに繋がる「半導体発光デバイス作製教材」の開発に取り組んだ。

LEDを動作させるためには、GaP発光層と良好な電気的特性を示す金属電極を形成しなければならない。本研究では、インジウムをベースにした金属を用いて電極を形成した結果、良好な金属電極が得られた。そして、窒素を添加して黄緑色で発光するGaP発光層を有するLED構造を作製し、黄緑色の発光が得られた。さらに、乾電池をGaP-LEDチップに接続して動作させるキットを試作し、LEDから明るい発光が確認できたことから工学教育活動などへの応用の可能性を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究代表者がこれまでに開発してきた様々な半導体デバイス作製教材と合わせて、この半導体発光デバイスを作製する教材が開発されることで、半導体材料が持つ特長を活用した半導体デバイス作製教材の整備につながるため、半導体デバイスの作製技術と動作原理を講義及び実験・実習を通して、より効果的に習得できる環境が整備されるようになる。

さらに、これまで研究代表者がSi太陽電池作製教材を使って行ってきたように、中学生などを対象にした科学技術啓蒙活動へ応用できる可能性があることから、将来の科学者・技術者の育成に有用な教材が開発できたのではないかと思われる。

研究成果の概要(英文)：We attempted to develop an educational resource of semiconductor light emitting devices fabrication that could lead to learning its manufacturing technology and studying theoretically principles of semiconductor light emitting devices, such as a light-emitting diode (LED). In this study, gallium phosphide was used as a material of an active layer for making a visible LED. In order to operate LED, it is necessary to form metal electrodes showing good electrical characteristics. In general, gold-based metals are used to form electrodes on III-V compound semiconductors. In this study, indium-based metals were adopted for formation of electrodes on GaP layer. As a result, good I-V characteristics are observed and also ohmic contacts are obtained by using indium-based materials.

Then, we made a light-emitting diode with a nitrogen-doped GaP layer that has yellow-green emission and evaluated the LED. As a result, it was confirmed that the LED showed bright yellow-green emission.

研究分野：半導体工学

キーワード：半導体発光デバイス 発光ダイオード 作製教材

### 1. 研究開始当初の背景

高専は、実践的・創造的な技術者の養成を目的として、「ものづくり」に特化した技術者教育を5年間一貫教育で行っており、専門科目に関係する実験で魅力的なテーマを実施することは、学生の学習意欲を継続的に刺激し、理論と実践の両面から専門的な知識・技術を効果的に習得させるために極めて重要である。

また、現在の高度情報化社会は、集積回路や様々な半導体デバイスの高速化及び高機能化によって実現されており、今後も様々な技術革新に半導体デバイスは必要不可欠である。そのため、大学・高専の電気電子工学系の学科で、半導体工学は重要な科目の一つとなっている。しかし、半導体デバイスの作製には一般に高価な装置と多くの作製工程が必要であることから、高専では半導体デバイスのものづくり教育の実施は容易ではなく、講義による知識の習得だけとなっていることが多い。

本研究代表者は、半導体工学の基礎を理論と実践の両面から理解することに役立てられるように、これまでシリコン (Si) 太陽電池及びMOS電界効果トランジスタ (MOSFET) などの半導体デバイスを作製する教材を開発し、教育現場へ展開してきた。開発したこれらの作製教材は、制限のある環境でも実現できるように、必要最低限の簡易な手法を使って半導体デバイスを作製できる。しかし、これまでに開発してきたのは、電子デバイス (pn接合ダイオード、MOSFET)、発電・受光デバイス (太陽電池、ホトダイオード) で、半導体材料の特長の一つである発光現象を利用した発光デバイスを作製する教材は開発できていない。発光デバイスを作製する教材が確立できれば、半導体材料が持つ特長を活用した半導体デバイス作製教材の整備に繋がるため、半導体デバイスの作製技術と動作原理を講義及び実験・実習を通して、より効果的に習得できるようになる。さらに、これまで本研究代表者がSi太陽電池作製教材を使って行ってきたように、科学技術啓蒙活動への応用も期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究では、他の大学・高専などの教育機関で開発実績がほとんどない、半導体発光デバイスの一つである発光ダイオード (LED) を作製する教材を開発し、学生が半導体工学をより良く理解するための一助とする。そして、開発を試みる半導体発光デバイス作製教材の科学技術啓蒙活動などへの応用も目指す。

### 3. 研究の方法

これまで作製してきたSi太陽電池及びMOSFETは、材料として半導体デバイスで最もよく使われているSiを使ってきたが、Siは間接遷移型半導体のため電流を流しても発光しない。また、半導体はそれぞれ材料固有のバンドギャップ (Eg) を有しており、半導体から得られる光の波長 ( $\lambda$ ) は、そのバンドギャップで決まるため、所望の波長の発光を得るには適当なバンドギャップを有する半導体を選択する必要がある。そこで本研究では、LEDの母材としてIII-V族化合物半導体の一つであるリン化ガリウム (GaP: Eg=2.26 [eV]) を使うことにした。GaPもSiと同様、間接遷移型半導体で発光効率は非常に低く、ほとんど発光しないが、発光中心となる不純物 (窒素、または亜鉛-酸素) を少量添加することで黄緑色もしくは赤色の可視発光が得られるようになる。

また、LEDは発光層が形成されたpn接合に順バイアスを印加して電流を流すことで発光する。発光層が形成されたpn接合を有するGaPに電圧を印加し、電流を流して発光を得るには、印加した電圧と流れる電流が線形比例する「オーミック接触」と呼ばれる良好な電気的特性を示す金属電極をGaPに形成しなければならない。一般に、III-V族化合物半導体の電極材料としては、金 (Au) をベースにした金属が幅広く用いられているが、金をベースにした金属は高価であることから、本研究では、金 (Au) より安価で比較的入手しやすいインジウム (In) をベースにした金属を用いてGaPへの電極の形成を試みた。

また、発光層を形成する、負の電荷を帯びた電子の多いn型GaPと正の電荷を帯びた正孔の多いp型GaPとでは、オーミック接触を示す電極材料が一般に異なることから、本研究では、n型GaPにはIn、p型GaPにはインジウム・亜鉛 (InZn) 合金を使って、オーミック電極の形成を試みた。

そして、インジウムをベースにしたGaP上への金属形成の形成を試みた後、窒素を添加してGaP発光層が形成された基板を使って、GaP-LED構造の作製を試み、LEDから可視発光が得られるか試みた。

### 4. 研究成果

一般に金属電極の形成は、真空蒸着法やスパッタリング法など、真空中で金属を加熱して気化したり、大きなエネルギーを持つイオンを金属ターゲットに衝突させることで金属薄膜を形成するが、インジウム (In) をベースにした金属は融点が高いという特徴を活かして、大気環境下と

いう非常に取り扱いやすい環境で n 型 GaP 上に In, p 型 GaP 上に InZn 電極を形成した。

その結果, n 型 GaP 上の In 電極間, p 型 GaP 上の InZn 電極間それぞれの電流-電圧特性は, 電流が電圧に比例する線形性を示し, n 型 GaP 層及び p 型 GaP 層それぞれで In 系金属を使ってオーミック電極が形成できることを確認した。

n 型 GaP 層及び p 型 GaP 層それぞれでオーミック電極の形成が確認できたことから, 微量の窒素を添加した GaP 発光層の n 型側に In, p 型側に InZn を接触させ, 両面にオーミック電極を形成した InZn/p 型 GaP/n 型 GaP 発光層/n 型 GaP 基板/In で構成される, 図 1 に示す GaP-LED 構造を作製し, 電流密度-電圧特性を測定した。

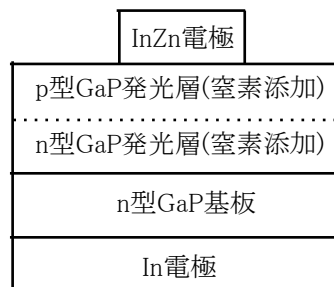


図1 GaP-LED構造

図 2 に GaP-LED 構造の電流密度-電圧特性を示す。図 2 に示すように, 逆方向電圧を印加した時, ほとんど電流は流れず, 順方向電圧を印加した時には電流密度が電圧の増加に対して指数関数的に増加する整流性を示していることが確認できた。pn 接合を形成した GaP 発光層の両面に金属電極を形成した GaP-LED 構造の電流密度-電圧特性がこのような整流性を示したということは, GaP-LED 構造において良好な金属電極が形成されたことを示しており, この GaP-LED 構造で LED が作製可能であることが確認できた。

GaP-LED 構造で良好な金属電極が形成できたことから, GaP-LED 構造に順方向電圧を印加し, 5mA 程度の電流を流して GaP-LED 構造からの発光を確認したところ, 図 3 に示すように, 室内照明が明るく点灯した状態であっても GaP-LED 構造を形成した GaP 基板全面から明るい黄緑色の可視発光が確認できた。

この発光スペクトルの分光特性を測定した結果を図 4 に示す。図 4 に示すように, 発光のピーク波長 ( $\lambda$ ) は 567[nm]であり, この発光スペクトルからも黄緑色の発光が得られたことが確認できた。

以上の結果, 窒素を添加して黄緑色に発光する GaP 発光層にインジウムをベースにした金属電極を形成して可視発光する LED を作製する教材を開発できる見通しが得られた。さらに, 単 3 乾電池 2 本を GaP-LED 構造に接続して動作させるキットを試作したところ, 図 5 に示すように, 乾電池駆動で LED の発光が確認できたことから, この半導体発光デバイス作製教材の工学教育活動などへの応用の可能性も示すことができた。

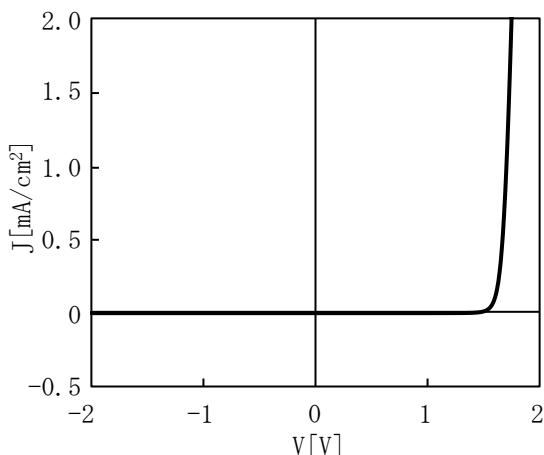


図2 GaP-LED構造の電流密度-電圧特性

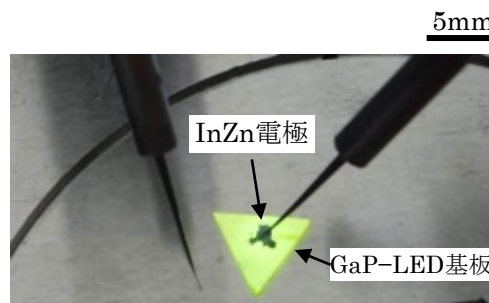


図3 GaP-LED構造を形成した基板からの発光

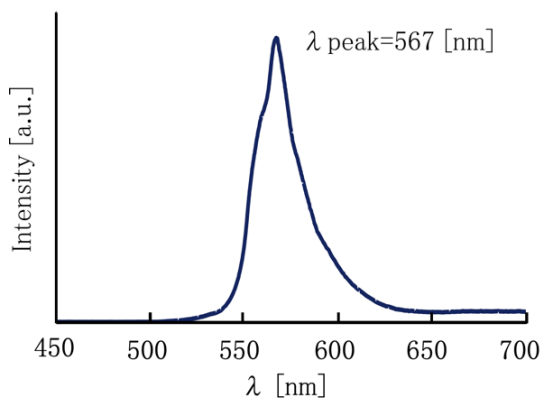


図4 GaP-LED構造の発光スペクトル

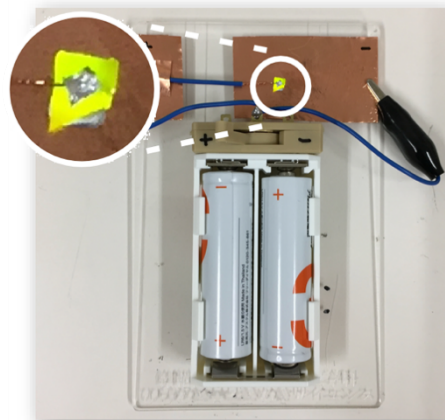


図5 LED動作確認キット

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 辻琢人, 関口寛人, 若原昭浩
2. 発表標題 半導体発光素子作製教材の開発
3. 学会等名 計測自動制御学会中部支部第164回教育工学研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻琢人, 関口寛人, 若原昭浩
2. 発表標題 可視光域で発光するLED作製教材の開発の検討
3. 学会等名 平成30年度工学教育研究講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻琢人, 村上舞
2. 発表標題 可視光域で発光する半導体発光素子作製教材の開発
3. 学会等名 平成30年度先進的技術に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻琢人, 関口寛人, 若原昭浩
2. 発表標題 半導体デバイス作製教材の開発と応用
3. 学会等名 高専・豊橋技科大IoT研究会2018年度総会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------