

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：56301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01004

研究課題名(和文) 高専教育への青色LED製作実験の導入

研究課題名(英文) Introduction of experiments using blue LED fabrication to the education of National institution of technology

研究代表者

和田 直樹 (WADA, NAOKI)

新居浜工業高等専門学校・電気情報工学科・教授

研究者番号：90632787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：今後の高度情報化社会では、より高集積で、より早く、より高機能な半導体デバイスが必要とされる。そこで、高専教育の高度化のために、理論と実践の両面から半導体デバイスを理解できる教育用教材の開発が望まれている。一方、日本の3人の研究者がノーベル賞を受賞したことより、高専の学生は青色LEDに興味を持っている。そこで、この青色LEDを用いて、学生たちにLEDの発光理論と製法、発熱の問題を理解させるための実験方法を開発し、実際に新居浜高専の4年生の工学実験に導入した。そして、実験導入による教育効果について、実験前後の試験とアンケートにより検証を行った。本実験は、学生たちには好評であった。

研究成果の概要(英文)：Since semiconductor devices with higher integration, higher speed and higher functionality are required in an advanced information society, the development of educational resource which make students understand the semiconductor devices from both sides of theory and practice are desired to improve the education level in National institute of technology. On the other hand, students are interested in the blue light emitting diode (LED) because three Japanese researchers won the Nobel Prize. Therefore, experimental methods using the blue LED were developed to make them understand the theory of light emitting, fabrication methods and the problem of heat generation of LED. Then, this developed experiments using the blue LED were introduced into an engineering experiment for fourth grade in Niihama college actually. The educational effectiveness was verified by an examination and a questionnaire before and after the experiments. The experiments had a good reputation among the students.

研究分野：半導体工学

キーワード：工学教育 学生実験 半導体 青色LED 発熱 熱抵抗 高専教育

1. 研究開始当初の背景

IoT (Internet of Things) 時代を迎え、今後益々電子技術の発展が重要となっている。しかし、現在の日本の電子産業は、デジタル化に伴うコモディティ化により、新興国の追い上げを受けている。特に電子技術を支える半導体産業の衰退が危惧される。そこで、我が国の持続的発展のためには、すぐに真似のできない半導体材料からの本質的な研究開発に注力すべきである。

そのためには、高等教育機関において、理論と実践の両面からの半導体人材教育が求められる。特に、頭の柔らかい若年層からのものづくり教育機関である高専教育の高度化が望まれる。

しかし、半導体素子の製作には高価な装置や危険なガス・薬品が必要で、これまでは実験を通しての実践的な知識の習得は難しく、講義のみによる知識の習得が中心となっている。

一方、青色LEDは、日本人3名のノーベル賞受賞によって、改めて半導体材料研究の重要性を認識させ、学生らもこのテーマに強い関心と興味を持っている。

2. 研究の目的

技術開発の本質を理解する新しい実践教育のために、以下の3点に特徴をおいた青色LED製作と特性測定の実験教材を開発して、真の日本の科学技術発展に貢献できる若手技術者の育成につなげることを目的とする。

- (1) 実際に青色LED製作と発光現象を体験して、半導体への興味を深める。
- (2) 最先端デバイス設計上の最重要課題である発熱の問題を理解する。
- (3) 青色LED発明につながった重要な技術とその背景を理解する。

3. 研究の方法

- (1) 学生実験用の安全で簡便な青色LED製作工程を作成する。
- (2) 製作したLEDを用いて、半導体デバイス設計上最も重要な発熱の問題を理解するための特性測定実験を作成する。
- (3) 青色LED製作工程と特性測定、及び青色LED発明の技術背景を実験テキストにまとめる。
- (4) 実際に学生実験に導入して、実験導入前後にアンケートとテストを実施して、その結果から導入効果を検証する。

4. 研究成果

(1) 青色LED製作工程の作成

図1に今回学生実験用に設計した青色LED構造とマスクパターンを示す。電極形状は、電流密度を変えるために、一般的な電極面積である $\phi 350\mu\text{m}$ を中心に $\phi 200\mu\text{m}$ と $\phi 500\mu\text{m}$ の円形とし、市販のLED形状を模したのも用意した。マスクパターン寸法は10mm角である。

図2に今回学生実験用に開発した青色LED製

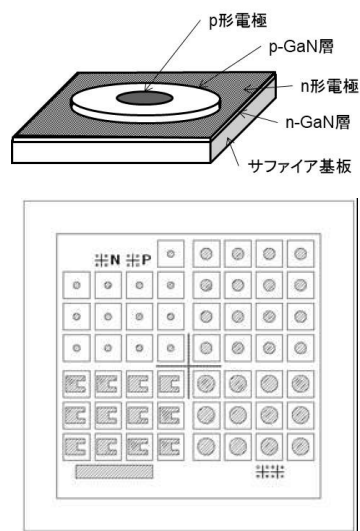


図1. 青色LED構造とマスクパターン

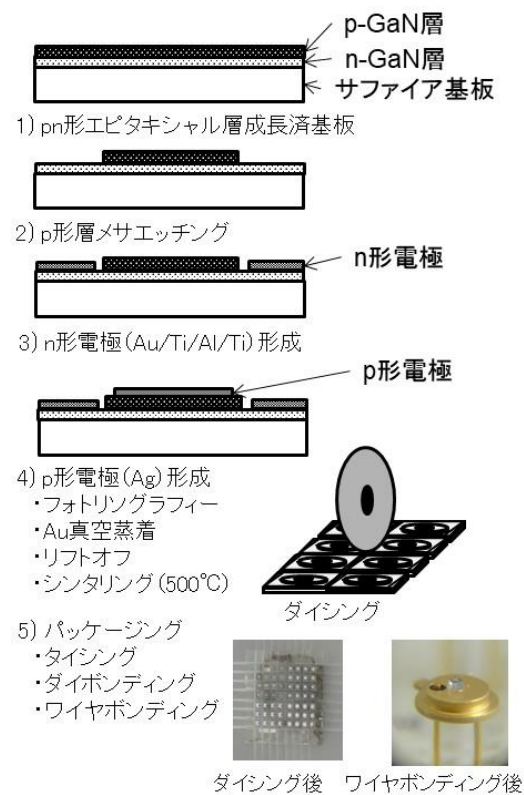


図2. 学生実験用の青色LED製作工程

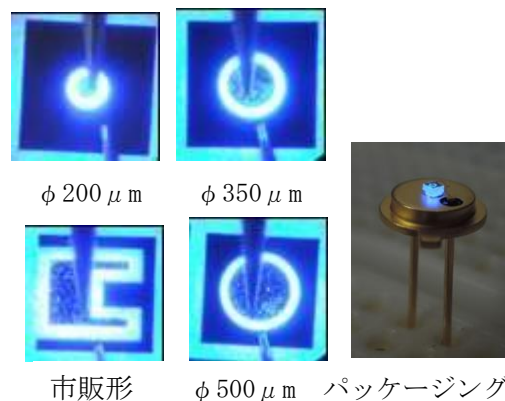


図3. 製作したLEDチップとパッケージング後の青色発光の様子

作工程を示す。まず青色発光用のpn形エピタキシャル層成長済基板を調達する。マスクパターンの大きさに合わせて基板を10mm角に切断する。豊橋技術科学大学にてp形メサエッチングとn形電極 (Ti/Al/Ti/Au) を形成する。

新居浜高専の学生実験では、このn形電極形成済基板の供給を受けて、p形電極形成からパッケージングまでの工程を行う。まずp形電極材料には一般的には採用されないが学生実験用としては安価で取り扱いが簡単なAg電極を採用した。また、フォトリソト工程では、容易にリフトオフ法による電極パターン形成ができるように、通常のポジレジストの下にリフトオフ用レジストを採用した。シンタリングは、窒素雰囲気中、500°C1分の熱処理を行った。パッケージング工程では、ダイシング装置にて10mm角基板を0.95mm角チップに切断した。ダイボンディング装置にてダイアタッチ材を用いてTO-46Sヘッダー上にチップを接着後、ウェッジワイヤボンディング装置にて金線で各pn電極とヘッダー間を接続した。

以上より、多元電子ビーム蒸着装置や反応性イオンエッチング装置などの高価な装置や危険なガス、薬品を使用することなく、学生実験用に安全で簡単な製作プロセスを実現できた。図3に、製作したLEDチップとパッケージング後の青色発光の様子を示す。このように駆動電圧3V程度で明るい発光が得られる。

(2) 青色LED特性測定実験の作成

発熱の問題を理解させるために、図4に示す熱抵抗の異なる3種類のLEDパッケージを作製した。チップとヘッダーの間に厚さ0.15mmのほう珪酸ガラス板を1または2枚挿入することで発光層からヘッダーまでの熱抵抗を変えている。各パッケージにおけるヘッダーまでの熱抵抗は、次式に示す簡易法で計算してガラス板挿入なしの場合は11K/W、ガラス板を1枚挿入した場合は180K/W、2枚挿入した場合は340K/Wとなる。

$$\theta = \frac{t}{\lambda \cdot S} \quad \theta \text{ は熱抵抗、} \lambda \text{ は熱伝導度、}$$

S は面積、 t は厚さ

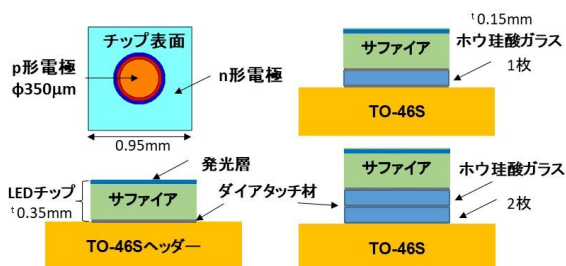


図4. 熱抵抗の異なる3種類のLEDパッケージ

まず、各パッケージの ΔV_F 法による熱抵抗測定を行った。 ΔV_F 法によってLEDの発光部の温度 (ジャンクション温度: T_j) を測定できる。図5に自作した ΔV_F 測定装置を示す。図6



図5. ΔV_F 測定装置

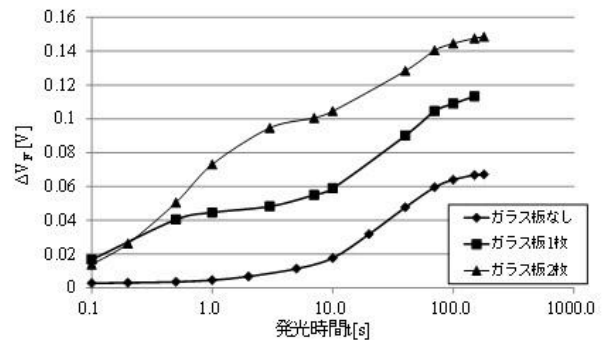


図6. 発光時間と ΔV_F の関係

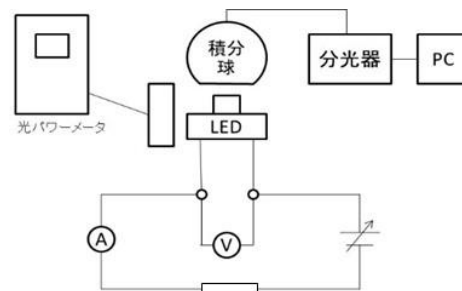


図7. 駆動電流と光出力、発光波長の関係測定装置構成

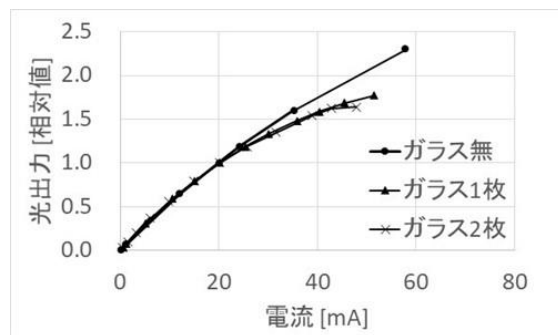


図8. 駆動電流と光出力の関係

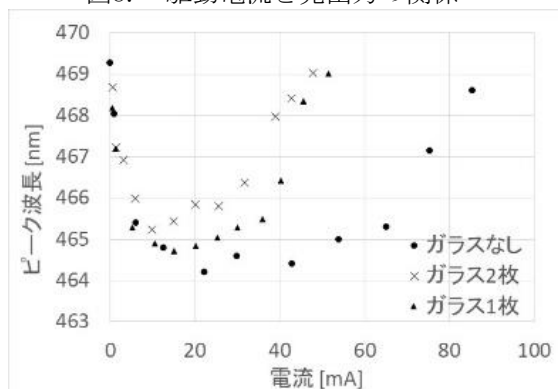


図9. 駆動電流と発光波長の関係

に、熱抵抗が異なる3つのパッケージの発光時間と ΔV_F の関係を示す。 ΔV_F の大きさは T_j の温度上昇を示している。ガラス板を挿入することで熱抵抗が増加して T_j が上昇している。予めLEDの温度と V_F の関係を測定しておけば、この結果から T_j が測定できる。ガラス板挿入なしでは T_j は45°Cであるが、ガラスを2枚挿入することで T_j は79°Cまで上昇する。この温度上昇分を投入電力で割ることで熱抵抗が測定できる。ガラス板挿入なしとガラス板2枚挿入の熱抵抗は、それぞれ230、590[K/W]である。先の簡易計算とは、ダイアタッチ材による接着状態によって異なる。

図7に駆動電流と光出力、発光波長の関係を測定する装置構成を示す。図8に熱抵抗が異なる3つのパッケージの駆動電流と光出力の関係を示す。ガラス板挿入無しと比べガラス板を挿入したものは電流を増加させると光出力が低下している。図9に熱抵抗が異なる3つのパッケージの駆動電流と発光波長の関係を示す。電流を増やすと発光ピーク波長が始め短くなり、その後長くなる。ガラス板を挿入するとその波長が長くなる電流値が低くなっている。

(3) 実験テキストの作成

以下の項目からなるA4判20ページのテキストを作成した。8つの実験課題と8つの考察課題からなり、実験の後に考察課題に答えることで原理的な内容が理解できるようになっている。そのため、実験手順以外に、製作方法の説明、 ΔV_F 法の原理、図6、図8、図9の特性になる理由を考察できる技術解説を含んでいる。また、最後に青色LED発明の技術背景を説明した技術解説を添付しており、それを読んで感想文を書くことで、常識に捕らわれずに最先端技術に挑戦し続けることの重要性が理解できるように工夫していることが大きな特徴である。

1. 目的
2. 青色LEDの基本原理
3. 製作方法
 - 3.1 フォトリソグラフィ法について
 - 3.2 真空蒸着法による電極形成
 - 3.3 ダイシング
 - 3.4 ダイボンディング
 - 3.5 ワイヤボンディング
 - 3.6 学生実験用のLEDの構造
4. 製作実験
 - 4.1 実験における注意点
 - 4.2 青色LEDの製作工程
 - 4.3 p形電極形成
 - 1) フォトリソグラフィ
 - 2) 真空蒸着
 - 3) リフトオフ
 - 4) シンタリング
 - 4.4 パッケージング (後工程)
 - 1) ダイシング
 - 2) ダイボンディング

- 3) ワイヤボンディング
5. 特性評価
 - 5.1 はじめに
 - 5.2 LEDパッケージの形状
 - 5.3 熱抵抗計算
 - 5.4 ΔV_F 法
 - 1) ΔV_F 法の原理
 - 2) ΔV_F 法の測定装置
 - 3) T_j と V_F の関係
 - 5.5 LED電流と光出力の関係、LED電流と発光波長の関係
 - 1) 青色LEDの発光効率と発光波長
6. 青色LEDは、なぜ大発明につながったか。

(4) 学生実験の導入と効果

新居浜高専電気情報工学科のカリキュラムでは、半導体関係の講義は、3年前期に電子工学を1単位、通期で基礎半導体工学を2単位、5年後期に半導体工学を1単位実施している。実験は、4年後期に太陽電池の製作を実施している。そこで、この太陽電池の製作に替えて、「青色LEDの製作と評価」を導入した。時間数は、1週当たり金曜日3時間、月曜日2時間の計5時間、3週間にわたり計15時間実施した。

表1に、実験内容と時間配分を示す。4年生39名を前半A班(19名)と後半B班(20名)に分けて、更に、A班・B班の学生を製作班と特性測定班の2班に分けて交替して実施した。

表1. 実験内容と時間配分

		回数	時間数	実験内容
A班	前半	1回目	2	アンケート、理解度テスト 製作班: 1. フォトリソグラフィ, 2. ダイワイヤボンディング 測定班: 1.2. 青色LEDの特性に関する講義
		2回目	3	製作班: 1. ダイワイヤボンディング, 2. フォトリソグラフィ 測定班: 1. ΔV_F 測定, 2. 電流-光出力, 発光波長測定
		3回目	2	製作班: 1.2. 真空蒸着/リフトオフ 測定班: 1. 電流-光出力, 発光波長測定, 2. ΔV_F 測定 1.2. 青色LEDの技術開発についての講義
	後半	4回目	3	製作班: 1. フォトリソグラフィ, 2. ダイワイヤボンディング 測定班: 1.2. 青色LEDの特性に関する講義 1. ΔV_F 測定, 2. 電流-光出力, 発光波長測定
		5回目	2	製作班: 1. ダイワイヤボンディング, 2. フォトリソグラフィ 測定班: 1. ΔV_F 測定, 2. 電流-光出力, 発光波長測定
		6回目	3	製作班: 1.2. 真空蒸着/リフトオフ 測定班: 1. 電流-光出力, 発光波長測定, 2. ΔV_F 測定 1.2. 青色LEDの技術開発についての講義 アンケート、理解度テスト
B班	前半	1回目	3	アンケート、理解度テスト 製作班: 1. フォトリソグラフィ, 2. ダイワイヤボンディング 測定班: 1.2. 青色LEDの特性に関する講義 1. ΔV_F 測定, 2. 電流-光出力, 発光波長測定
		2回目	2	製作班: 1. ダイワイヤボンディング, 2. フォトリソグラフィ 測定班: 1. ΔV_F 測定, 2. 電流-光出力, 発光波長測定
		3回目	3	製作班: 1.2. 真空蒸着/リフトオフ 測定班: 1. 電流-光出力, 発光波長測定, 2. ΔV_F 測定 1.2. 青色LEDの技術開発についての講義
	後半	4回目	2	製作班: 1. フォトリソグラフィ, 2. ダイワイヤボンディング 測定班: 1.2. 青色LEDの特性に関する講義
		5回目	3	製作班: 1. ダイワイヤボンディング, 2. フォトリソグラフィ 測定班: 1. ΔV_F 測定, 2. 電流-光出力, 発光波長測定
		6回目	2	製作班: 1.2. 真空蒸着/リフトオフ 測定班: 1. 電流-光出力, 発光波長測定, 2. ΔV_F 測定 1.2. 青色LEDの技術開発についての講義 アンケート、理解度テスト

授業時間数に合わせるために、青色LED製作工程は、フォトリソグラフィ、真空蒸着/リフトオフ、ダイ/ワイヤボンディングを実施し、他は説明に留めた。また、学生が実際に

作業で用いる基板には、実際のサファイア基板ではなく、18mm角のガラス板を用いた。ただし、学生に作業を説明するときは、教員がサファイア基板を用いて作業を進め、全工程終了後にこの基板を用いて青色発光の観測を行った。

製作班では、全学生に製作作業を体験させることを優先して、待ち時間に別の作業を行うために作業順は工程順にはなっていない。特性測定班では、1回目に青色LEDの原理、 ΔV_F 法や熱抵抗の解説を実施、2回目に ΔV_F 測定班と光出力・発光波長測定班に分けて実験、3回目は実験内容を交替した。最後に青色LEDが発明に至った技術開発の経緯を説明した。

実験の効果を確認するために、実験前後に同じ内容のテストとアンケートを実施した。テストはpn接合と青色LEDの原理に関する基礎的問題、LED特性と発熱の影響に関する問題(30問)からなっている。アンケートは、興味、理解度、安全(計27問)に関する質問からなっている。選択肢は(はい、どちらかと言えばはい、どちらとも言えない、どちらかと言えばいいえ、いいえ)を(5、4、3、2、1点)として点数化した。



図10 フォトリソグラフィ作業の様子



図11 ワイヤボンディング作業の様子

図10にフォトリソグラフィ作業、図11にワイヤボンディング作業の様子を示す。製作実験で使用した装置は、学生にとって初めて接するものであったことから、興味を持って実験に取り組んでいた。また、電気情報工学科ではこの実験まで薬品等を使用する機会がなかったことからフォトリソグラフィやリフトオフ作業に興味を示す学生もいた。特に、リフトオフ後に電極がマスクパターン通りに残っている様子を見ると、感心しているよう

だった。

実験前後で実施したテストとアンケートに関しては、実験前後でのテスト全体の正答率は47%から63%に上昇し、平均点は14.1点から18.9点に上昇した。特にpn接合の拡散電流の問題、LEDのエネルギーバンド図に関する問題、青色LEDの材料の問題、電流と光出力・発光波長のグラフに関する問題は正答率が大きく向上した。また、アンケートでは、実験前後での興味に関する項目の評価値の平均点数は0.58点増加、理解度に関する項目の評価値の平均点数は1.20点増加した。特に増加が大きかった項目は、フォトリソグラフィ1.82点、真空蒸着法1.87点、リフトオフ1.90点、ダイボンディング・ワイヤボンディング2.24点、LEDの温度と駆動電圧の関係1.61点、発熱が発光効率に与える影響1.75点、発熱が発光波長に与える影響1.59点、青色LEDの発明に至った重要技術1.70点など実際に学生が作業を行った内容や実験中に解説した内容であった。特に発熱の問題について学生の理解度を向上させることができ、所期の目的を達成できた。安全に関しては4.95点で問題はなかった。自由記述の感想欄には、「もっと半導体について深く知りたいと思った」、「授業ではピンとこなかった部分も実際に体験することで分かることもあった」、「自分で青色を作ってみたいと感じる程、キレイだった」、「今まで知らなかった特性を知れて勉強になった」など肯定的な意見が寄せられ好評であった。しかし、待ち時間が長いとの指摘もあり、さらに実験項目や作業内容などを改善していきたい。

また、青色LED発明の技術背景を説明した技術解説を読んで、以下に示すような感想が得られ、技術開発の心構えを教えることができた。「新しい物をつくるためには誰もやってないこと、又はやらないことに挑戦し続けることが必要であると思った」、「何度も何度もあきらめずにやり遂げた人のみ喜びが待っているということを教訓にします」、「始めから『無理だ』と決めつけるのではなく、『やってみる』ことの大切さがわかった」、「周辺技術があったからこそ無理だと思われていた発明ができたと思いました」、「一人の力だけでなく多くの先人の知恵をもとにした研究だったから成功したように感じた。何かを研究するときには先人の知恵にも視野を広げて見落とすことがないようにしたいと思った」。

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1件)

①塩貝一樹、和田直樹、若原昭浩、S i 太陽電池製作とエネルギー変換効率シミュレーションを利用した半導体教育の実践、工学教育、査読有、第65巻、2017、56-61、DOI:10.4307/jsee.65.2_56

〔学会発表〕（計8件）

- ①塩貝一樹、和田直樹、曾我崇伍、若原昭浩、関口寛人、酒井士郎、重松優太、近藤和真、青色LED製作を利用した半導体教育の実践－教育効果－、第65回応用物理学会春季学術講演会、18a-P1-27、2018
- ②曾我崇伍、塩貝一樹、和田直樹、若原昭浩、関口寛人、酒井士郎、重松優太、近藤和真、青色LED製作を利用した半導体教育の実践－実験方法－、第65回応用物理学会春季学術講演会、18a-P1-26、2018
- ③曾我崇伍、重松優太、近藤和真、塩貝一樹、和田直樹、若原昭浩、酒井士郎、熱抵抗の異なる青色LEDを使った学生実験、平成29年度電気関係学会四国支部連合大会、11-4、2017
- ④塩貝一樹、和田直樹、若原昭浩、関口寛人、酒井士郎、青色LEDを使った学生実験テーマの開発－製作プロセス－、第64回応用物理学会春季学術講演会、16a-P1-19、2017
- ⑤和田直樹、塩貝一樹、若原昭浩、関口寛人、酒井士郎、青色LEDを使った学生実験テーマの開発－熱抵抗－、第64回応用物理学会春季学術講演会、16a-P1-18、2017
- ⑥後藤祐真、村上成汐、曾我崇伍、脇昇子、塩貝一樹、和田直樹、若原昭浩、学生実験用太陽電池変換効率シミュレーションと分光感度測定、平成28年度電気関係学会四国支部連合大会、11-2、2016
- ⑦塩貝一樹、和田直樹、若原昭浩、山根啓輔、酒井士郎、学生実験用の青色LED製作工程の開発、第77回応用物理学会秋季学術講演会、14a-P1-12、2016
- ⑧和田直樹、塩貝一樹、若原昭浩、Si太陽電池製作を利用した半導体教育の実践、第63回応用物理学会春季学術講演会、21a-P2-12、2016

〔その他〕

- ①和田直樹、塩貝一樹、後藤祐真、脇昇子、若原昭浩、山根啓輔、太陽電池製作と変換効率シミュレーションを用いた学生実験テーマの作成、豊橋技術科学大学平成28年度高専連携教育研究プロジェクト進捗状況報告会、2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 直樹 (WADA, Naoki)
新居浜工業高等専門学校・電気情報工学科・教授
研究者番号：90632787

(2) 研究分担者

若原 昭浩 (WAKAHARA, Akihiro)
豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授
研究者番号：00230912

酒井 士郎 (SAKAI, Shiro)
徳島大学・大学院社会産業理工学研究部（理工学域）・教授
研究者番号：20135411

塩貝 一樹 (SHIOGAI, Kazuki)
新居浜工業高等専門学校・電気情報工学科・助教
研究者番号：50757664