

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420237

研究課題名(和文)パルスレーザーラマン散乱法によるLED発光部のリモート温度計測

研究課題名(英文) Remote measurement of junction temperature of LEDs using pulsed-laser Raman scattering spectroscopy

研究代表者

山形 幸彦 (Yukihiko, Yamagata)

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号：70239862

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：パルスレーザーラマン散乱を用いた発光中のLEDのジャンクション温度の非接触・リモート計測法の確立を目指して研究を行った。シート状レーザー光、及び開発した微弱ラマン光の高感度、高波長分解受光システムを用いて、青色LEDモジュールの複数チップからのGaNラマンスペクトル(GaN-E2H)を同時取得した。スペクトルフィッティングにより波長決定精度を向上し、発光中のLEDにおいて複数チップのジャンクション温度の同時計測に初めて成功した。また、白色LED用の蛍光樹脂がラマン散乱計測に与える影響を調査し、それを回避することで白色LEDからのラマンスペクトル検出に初めて成功した。

研究成果の概要(英文)：A novel method by using a pulsed-laser Raman scattering technique was employed to estimate junction temperatures of several chips arranged on a straight line in a phosphor-less blue-LED package and a phosphor-deposited blue-LED (white-LED) package. Simultaneous observation of GaN-E2H Raman spectra from the several chips was done successfully by using a sheet-shaped laser beam. This technique was applied to estimation of the junction temperatures of the several chips in the phosphor-less blue LED package during operation. Also, the GaN-E2H Raman signal from the white-LED was observed for the first time by using a 633 nm laser reducing the influence of the phosphor and the scatterer on the Raman measurement. It is concluded that this technique would be a useful method for remoteness and simultaneous multipoint measurement of the junction temperature of a white-LED package in which several chips are integrated.

研究分野：工学

キーワード：LED ジャンクション温度 パルスレーザー ラマン散乱 GaN 蛍光樹脂 温度分布 同時計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 革新的省エネの基幹技術として期待されるパワーデバイスには GaN, SiC 等のワイドギャップ半導体が使われており、大電流動作下での高効率化、長寿命化、高安定動作が強く望まれている。省エネ照明光源として普及してきた白色 LED も GaN 層が利用され、既に蛍光ランプを超える効率と長寿命を達成している。1チップでは効率 250 lm/W 超、寿命 5 万時間超の LED も開発されており、その照明用光源への投入は著しい省エネ・省資源化をもたらす。しかしながら、照明（大光量）利用の際、複数チップの直・並列接続による集積化、及び大電流化に伴う LED 発光（ジャンクション）部の温度上昇が大きな問題となる。大電流動作時の電源回路も含めてジャンクション温度の上昇により、照明用 LED は 1チップの場合に比べ、効率が半分程度まで低下する。寿命も、例えばジャンクション温度が 150 の場合で 5 万時間以上の LED が 190 では 1 千時間以下と、温度上昇により著しく低下する。従って、高効率、長寿命な照明用 LED デバイス開発において、ジャンクション部、及びデバイス各部の精密な温度測定と計測結果を基にしたデバイス全体の放熱設計が最重要ミッションとなっている。

(2) 温度計測には一般的に熱電対が利用されるが、LED のジャンクション温度の直接計測は出来ず、微小部位での測定では熱電対の熱容量や熱伝導、密着性に起因する測定誤差が大きく、複数点の同時計測では配線が煩雑となり、デバイス全体の温度分布計測も困難である。放射温度計による光学的方法では、LED の自発光が大きな外乱となる事に加え、分光放射率が測定部位の材料物性や表面状態に大きく依存するため、十分な測定精度を確保できない。CW レーザーを用いた顕微ラマン法により 1 チップの温度を計測した例はあるが、顕微鏡システムによりレーザー照射領域を狭小にしてレーザーパワー密度を確保する必要性から、対物レンズと被測定試料が近接（1mm 程度）し、測定可能範囲も 1mm 程度と小さい。従って、発光している複数の LED チップのジャンクション温度のリモート計測には適用できない。チップの $V-I$ 特性からジャンクション温度を推定する V_f 法では、直・並列接続された複数チップの平均的温度となることや、蛍光樹脂による LED 発光の戻り光が温度上昇に与える影響を排除できないなどの問題点がある。この様に、LED デバイス、特に発光中のジャンクション温度の直接測定は国内外を問わずできておらず、標準的な温度計測法はまだ確立されていない。

(3) 本課題研究では、パルスレーザーラマン散乱による LED の標準的温度計測システムを提案し、その確立に向けた研究を行う。各種のレーザー散乱計測や分光分析による温度計測は申請者が永年培ってきた技術で、放電プラズマや照明ランプ中の粒子密度、温度等の諸パラメータ計測を通じて、様々な物理現象

を明らかにしてきた。短パルス（～数 ns）レーザー使用の利点は、レーザーエネルギーが小さく（mJ オーダー）、照射面積が比較的大きく（cm オーダー）でも、ラマン散乱に十分なレーザーパワー密度（W/cm²、信号強度に比例）を達成できる、レーザーに同期したゲート機構付の受光システムを用いる事で強い外乱光の影響を排除できる、レーザー入射による温度上昇を抑制できる点である。これらを応用すれば、自発光中の LED チップのジャンクション温度を入射系、受光系を被測定対象から離して非接触・リモート計測できる手法を実現可能となる。

2. 研究の目的

本課題研究では、短パルスレーザーを LED に入射し、LED の pin 構造（GaN/InGaN/GaN）内の GaN 層からのラマン散乱光（ E_2^H モード）を観測する。温度に依存するラマンピークの波長シフト量から、動作中のジャンクション部の温度を直接計測する。Nd:YAG レーザーの SHG（532 nm）を用いた最近の予備実験で、蛍光樹脂なし LED において、温度によるラマンピークのシフト量変化、及び強い LED 自発光下でも測定が可能である事を明らかにした。一方、黄色蛍光樹脂が塗布された白色 LED では、黄色蛍光体からのレーザーに同期した励起発光、及びレーザー光、及びラマン光の樹脂による散乱が起こり、発光動作中の白色 LED での温度計測は現段階では困難であり、未だ実現されていない。そこで、本研究は、先ず A) 蛍光樹脂が塗布されていない青色 LED のジャンクション温度計測システムの開発を目指す。目標とする測定誤差は ± 2 で、レーザー入射によるジャンクションの温度上昇を抑制した最適計測条件（繰返し周波数、パワー密度）を明らかにする。次に B) 蛍光樹脂が塗布された白色 LED におけるラマン散乱計測を可能とする計測システムの開発を目指す。A) の結果を基に、白色 LED の蛍光樹脂へのレーザー入射による蛍光発光、レーザー光やラマン散乱光の吸収、散乱が計測に与える影響を定量的に明らかにし、入射レーザー波長、パワー密度、および受光系を最適化して、それらを極力抑制するシステムを構築する。

3. 研究の方法

本課題研究では、レーザー入射及びラマン散乱受光を LED 表面に垂直で同軸とするコアキシャル型計測システムを新たに構築し、蛍光樹脂無し青色 LED モジュールのラマン散乱計測を通じて、構築したシステムの性能評価を行った。その結果、新たな受光システムにより、ラマン散乱信号強度の増大、レーザー散乱光及び迷光の十分な除去が行われ、SN 比の改善、及び測定時間の短縮を実現した。その後、シート状レーザー、及びゲート機能付き ICCD カメラの使用により、複数のチップが直・並列接続された LED モジュールでのジャンクシ

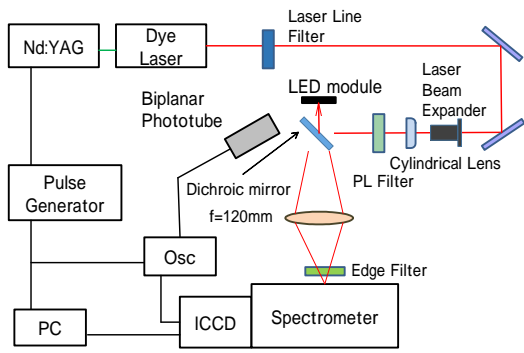


図 1. コアキシャル型パルスレーザーラマン散乱計測システムの実験装置図

ン温度の同時計測システムを構築した．図 1 にその概略を示す．パルス Nd:YAG レーザ励起の色素レーザー光 (632.816 nm, 0.12 mJ, パルス幅 10 ns) をビームエキスパンダーと円筒レンズを用いて 0.8 mm×15 mm のシート状にし、ダイクロイックミラーを介して LED モジュール内の直線上に配列された複数チップに照射した．集光レンズにより各 LED チップ (GaN 層) からの散乱光を分光器の入口スリット上に結像し、集光レンズと内部の分散システムに最適化を施したシングル分光器 (1800 本/mm, F10) (もしくはダブル分光器 (2×2400 本/mm, F5)) により、複数 LED チップからのラマン散乱画像を ICCD カメラで取得した．このシステムを用いて、青色、または白色 LED モジュールの複数チップからのラマンスペクトル (GaN 層からの E_2^H ラマン信号, 656.4 nm) を同時に取得した．計測には光子カウント法を用い、レーザー 5,000 ショット以上の積算処理を行った．また、白色 LED 前面に塗布された蛍光樹脂の光学特性を調査し、白色 LED 計測に与える影響について調査した．

4. 研究成果

(1) 図 2 に無点灯時 (20) の蛍光樹脂無し青色 LED モジュールの複数チップからのラマン信号を ICCD にて観測した画像を示す．画像の横方向は波長、縦方向は分光器のスリット長さ方向に対応してシート状レーザー

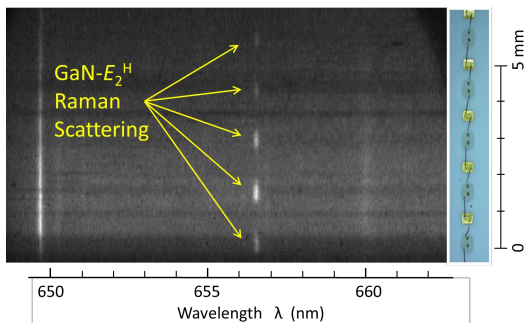


図 2. コアキシャル型システムで取得した青色 LED モジュールからのラマン散乱画像

光が照射された位置、画像の明暗が信号強度を意味する．チップの具体的な位置を明確にするため、画像の右側にチップの写真を示している．図より明らかな様に、各 LED チップに相当する位置において、656.5 nm 付近に破線状の輝線が検出されている．これらは GaN 層からのラマン信号 (GaN- E_2^H モード) であり、複数チップからのラマンスペクトルの同時取得に成功した．一方、649.6 nm 付近ではチップの有無にかかわらず (実線状の) 輝線が観測され、これは基板である $-Al_2O_3$ のラマンピークである事が同定された．LED モジュールの動作電圧を 0 V (無点灯)、66 V, 68 V と変化させた場合に、No.3 及び No.4 のチップについて、縦軸を散乱強度、横軸を波長とした GaN- E_2^H ラマンスペクトルを図 3(a), (b) に示す．動作電圧の変化に伴って、観測されたラマンピークがシフトしており、青色 LED モジュール内の複数チップのジャンクション温度の同時測定が可能となった．また、観測スペクトルと、レーザースペクトル幅も含めた装置関数と GaN- E_2^H ラマンのスペクトル拡がりのコンボリューションとのフィッティング解析からラマンピーク波長を求める方法を確認した．図 3(c) にその一例を示す．このフィッティング操作により、ICCD の 1 ピクセルの実サイズ以下の決定精度でピーク

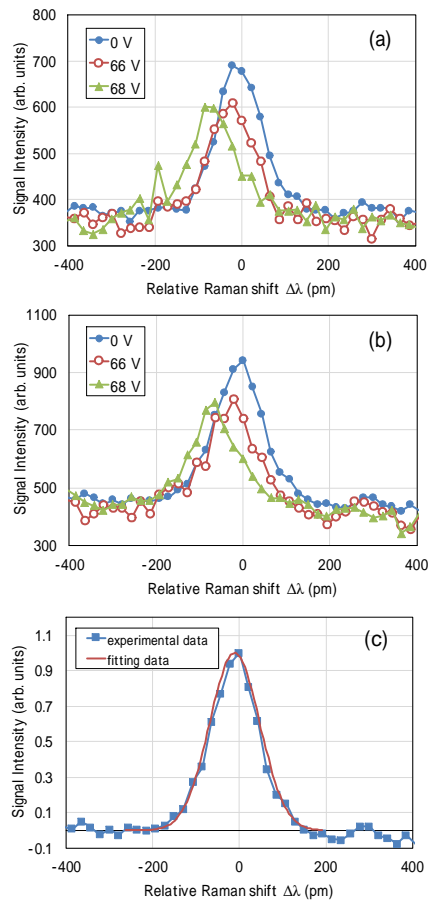


図 3. 各チップからのラマンスペクトル (a) No.3, (b) No.4, (c) ラマンプロファイルフィッティング

波長を推定できた．求めたピーク波長とラマンシフトの温度依存性から，チップ No.3 の 66 V 及び 68 V のジャンクション温度はそれぞれ 53 ± 20 °C， 127 ± 20 °C，チップ No.4 はそれぞれ 53 ± 20 °C， 119 ± 20 °C と推定された．図 4 に青色 LED モジュールの各チップのジャンクション温度の動作電圧依存性を示す．ピーク波長決定精度は約 30 pm (0.67 cm^{-1}) と推定され，これと 300-450 K の温度領域のラマンシフトの温度傾斜 66 K/cm^{-1} から温度測定誤差は ± 20 となっている．本システムを用いて，発光中の青色 LED モジュールの複数チップのジャンクション温度の同時測定に初めて成功した．

(2) 白色 LED 前面に塗布された蛍光樹脂がラマン計測に与える影響を調査するために，蛍光樹脂の吸収スペクトル及び蛍光スペクトルの解析を行った．その結果を図 5 に示す．ラマン散乱計測で通常使用される Nd:YAG レーザーは蛍光体の吸収スペクトル端に位置し，ラマン波長は蛍光発光のピーク付近であるため，ラマン散乱信号に同期してレーザー励起発光が観測され，ラマン信号が検出できない．一方，633 nm レーザーを使用することで，これを回避できることが明らかとなった．白色 LED モジュールに 633 nm のシート状レーザー光を入射し，各位置での散乱スペクトルを取得した．その結果を青色モジュールとともに図 6 に示す．それぞれの場合において，チップ位置とそれ以外での観測スペクトルとを比較検討することで，白色 LED ジャンクション部の $\text{GaN-}E_2^H$ ラマンスペクトルの同定・検出に初めて成功した．レーザー条件を最適化して蛍光樹脂の影響を抑制することで，白色 LED のジャンクション温度計測が可能である事を実証した．

(3) パルスレーザーラマン散乱法により，青色モジュール内の複数のジャンクション温度の同時計測，及び白色 LED から $\text{GaN-}E_2^H$ ラマン信号計測に初めて成功し，その有用性を示した．今後の課題として，分光システムの高波長分解化，スペクトルフィッティングによる波長決定精度の向上，及び散乱信号増大が挙げられる．それらにより温度測定精度 ± 2 以下の目標は達成されると思われる．本手法により，白色 LED モジュール内のジャンクションの 2

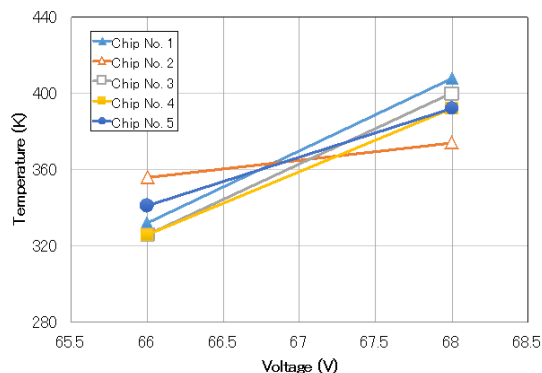


図 4．青色 LED モジュールの各チップのジャンクション温度の動作電圧依存性

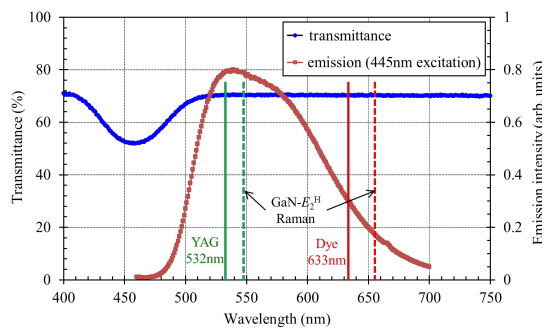


図 5．白色 LED に塗布された蛍光樹脂の透過特性，及び蛍光スペクトル

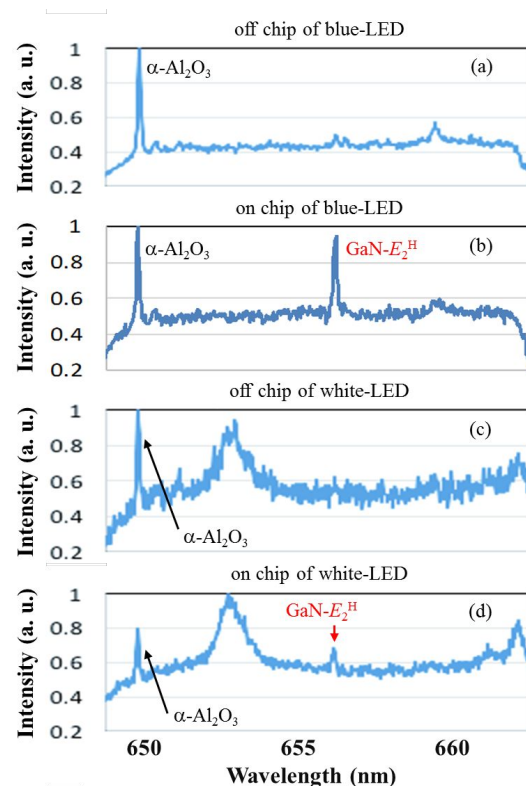


図 6．コアキシャル型システムで取得した青色，及び白色 LED モジュールからのラマン散乱スペクトル

(a) 青色チップ外，(b) 青色チップ位置，(c) 白色チップ外，(d) 白色チップ位置

次元温度分布計測や結晶成長中の基板・薄膜等の温度，若しくは歪み計測も可能となり，さらには，照明用 LD や他の半導体パワーデバイスの開発研究に非常に有効なツールになりうることを示した．

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

堀内誠，堤晋一，山形幸彦，富田健太郎，真鍋由雄，パルスレーザーラマン法を用いた動作中の青色 LED ジャンクション温度計測システムの開発，九州大学大学院総合理工学府報告，査読有，第 38 巻，第 2 号，2017，1-7.

M. Horiuchi, S. Tsutsumi, K. Tomita, Y. Manabe, Y. Yamagata, Development of simultaneous measurement system of junction temperatures in a LED module using pulsed-laser Raman scattering, Proceedings of the 15th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (Kyoto, Japan, May 22-27), 査読有, 2016, CP39 (2 pages).

S. Tsutsumi, M. Horiuchi, K. Tomita, Y. Manabe, Y. Yamagata, Influence of phosphor on junction-temperature measurement of white-LED using pulsed-laser Raman scattering, Proceedings of the 15th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (Kyoto, Japan, May 22-27), 査読有, 2016, CP40 (2 pages).

M. Horiuchi, Y. Yamagata, S. Tsutsumi, K. Tomita, Y. Manabe, Development of junction temperature estimation system for light-emitting LED using pulsed-laser Raman scattering, Journal of Solid State Lighting, 査読有, Vol. 2, 2015, DOI: 10.1186/s40539-015-0026-9.

Y. Yamagata, M. Horiuchi, K. Tomita, Y. Manabe, Development of temperature measurement system for LED junction using pulsed-laser Raman scattering, Proceedings of the 14th International Symposium on Science and Technology of Lighting (Como Lake, Italy, June 22-27), 査読有, 2014, 245-248.

[学会発表](計9件)

堀内誠, 真鍋由雄, 堤晋一, 山形幸彦, 富田健太郎, パルスレーザーラマン法を用いた LED ジャンクション温度の同時計測システムの開発, 第 31 回光源物性とその応用研究会, 2016.12.16, 北とぴあ

Y. Yamagata, Pulsed-laser Raman scattering for measurement of junction temperature of white-LED, Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Lasers, Optics and Photonics (Invited talk), 2016.11.30, Atlanta, USA.

山形幸彦, 堤 晋一, 富田健太郎, 堀内誠, 真鍋由雄, パルスレーザーラマン法による照明用白色 LED のジャンクション温度計測システムの開発, 平成 28 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2016.9.29, 宮崎大学

堤晋一, 山形幸彦, 堀内誠, 真鍋由雄, パルスレーザーラマン法による照明用白色 LED のジャンクション温度計測システムの開発, 平成 28 年度照明学会全国大会, 2016.9.1, 日本大学.

堀内誠, 真鍋由雄, 堤晋一, 山形幸彦, 富田健太郎, パルスレーザーラマン法を

用いた LED ジャンクション温度計測システムの開発, 第 30 回光源物性とその応用研究会, 2015.12.18, 北とぴあ

堤晋一, 山形幸彦, 富田健太郎, 堀内誠, 真鍋由雄, パルスレーザーラマン法による LED モジュール内のジャンクション温度分布計測システムの開発, 平成 27 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2015.9.25, 福岡大学

堤晋一, 山形幸彦, 富田健太郎, 堀内誠, 真鍋由雄, パルスレーザーラマン法による LED モジュール内のジャンクション温度分布計測システムの開発, 平成 27 年度照明学会全国大会, 2015.8.28, 福井大学

山形幸彦, 堀内誠, 富田健太郎, 真鍋由雄, パルスレーザーラマン法による発光中 LED のジャンクション部の温度計測, 平成 26 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2014.9.18, 鹿児島大学

山形幸彦, 富田健太郎, 堀内誠, 真鍋由雄, パルスレーザーラマン法を用いた LED 接合部の温度計測システムの開発, 平成 26 年度照明学会全国大会, 2014.9.5, 埼玉大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.asem.kyushu-u.ac.jp/ep/ep01/jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山形 幸彦 (YAMAGATA YUKIHIKO)
九州大学・総合理工学研究院・准教授
研究者番号: 70239862

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し