

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

堀内 誠^{*1}・堤 晋一^{*2}・山形 幸彦^{*3,†}
富田 健太郎^{*3}・真鍋 由雄^{*4}

(平成28年12月29日 受理, 平成29年1月24日 掲載決定)

Development of junction temperature measurement system for blue LED in operation using pulsed-laser Raman scattering

Makoto Horiuchi, Shin-ichi Tsutsumi, Yukihiro Yamagata,
Kentaro Tomita and Yoshio Manabe

[†]E-mail of corresponding author: yamagata@asem.kyushu-u.ac.jp

A novel method by using a pulsed-laser Raman scattering technique was employed to estimate junction temperatures of a phosphor-less blue-LED module. Observation of GaN- E_2^H Raman spectra was done successfully and temperature dependent Raman spectra of GaN were detected. This technique was applied to simultaneous estimation of the junction temperatures of the several chips in the phosphor-less blue LED module in operation. It is concluded that this technique would be a useful method for remoteness and simultaneous multipoint measurement of the junction temperature of a LED module in which several chips are integrated.

Key words: GaN, LED, Raman spectroscopy, Pulsed-laser, Junction temperature

1. 緒 言

近年、ワイドバンドギャップの GaN 半導体は、照明用 LED や LD、スイッチングパワーデバイスなどに、工業的に広く利用されるようになってきている。これらの中で、特に照明用途においては、大光量を得るために、多数のチップを集積化し、かつ大電流の下で動作させる必要があるため、ジャンクション部の温度が過度に上昇し、その結果生じる、効率、寿命、信頼性の著しい低下が大きな課題のひとつとなっている。そのため高性能な照明用 LED や LD の開発において、動作中のジャンクション温度の測定に基づく、デバイス全体の放熱設計を行うことが極めて重要である。

LED や LD などのジャンクション温度に関しては、顕微ラマン分光技術^{(1),(2),(3),(4),(5)}、ダイオード素子の順方向電圧の温度依存性 (V_f 方法)^{(6),(7)}、赤外線やネマチック液晶を応用した熱画像技術^{(8),(9)}など、その温度を推定する研究が幾つか報告されている。しかしながら、多数のチップが直並列に電氣的に接続される照明用白色 LED について言えば、例えば、 V_f 方法では、多数のチップが集積化された LED モジュール全体としての電流と電圧を測定することになり、個々のチップのジャンクション温度を評価することが出来ない。仮にそのモジュールの個々のチップが同じ電氣的特性を有しているとしても、熱輻射に起因する温度分布の不均一性の問題が生じる。熱画像技術は、2次元の温度測定に関し、優れた温度測定性能を有しているが⁽⁸⁾、分光放射率の正確な設定の困難さに加え、チップ表面

*1 量子プロセス理工学専攻博士課程

*2 量子プロセス理工学専攻修士課程

*3 融合創造理工学部門

*4 津山工業高等専門学校総合理工学科

に蛍光体を含む樹脂が塗布されている白色 LED の場合、チップからの輻射と蛍光体を含む樹脂からの輻射の分離が難しく、正確にジャンクション温度を評価できないという課題がある。また顕微ラマン分光技術は空間的に優れた分解性能を有し、ワンチップのジャンクション温度の測定に広く応用されているが、散乱光の検出が微小領域に限られるため、多数のチップが顕微ラマンの測定領域より相対的に広い範囲に配置された照明用の白色 LED モジュールでは、同時に複数のチップの温度を測定することが出来ない。このように、現状では、動作中の白色 LED モジュールのジャンクション温度を測定する手段が無く、その開発が強く望まれている。

本研究では、パルスレーザーを用いて、動作中の照明用白色 LED モジュールのジャンクション温度を直接・リモート測定することができるラマン散乱計測システムの構築を目的とする。入射光源にナノ秒パルスレーザーを使用することで、微小領域に CW レーザーを収束させる場合とは異なり、レーザー入射系及び受光系のオプティクスから離れている LED モジュールが、比較的強く自発光している場合においても、その LED モジュールからの微弱なラマン散乱信号を検出するのに十分なレーザーパワー密度を達成できる。このナノ秒パルスレーザーと長焦点レンズによるパルスレーザーラマン散乱技術は、リモートでかつ複数箇所の測定を同時に行える性能を有する。またゲート機能付きの ICCD カメラのような高い時間分解能を有する光検出器と組み合わせることで、LED 自身の強い放射光などの外乱光の影響を除去することが可能となり、将来、2次元的にリモート測定可能な照明用白色 LED のジャンクション温度の *in-situ* 計測法となりうる。著者らは、これまで、色素レーザーを用いたシステムを構築し、動作中の蛍光樹脂無し青色 LED のジャンクション温度を計測することで、本システムの有効性を示してきた^{(10),(11),(12),(13),(14)}。ここでは、パルスレーザーラマン散乱法による蛍光樹脂が無い青色 LED チップからのラマンスペクトルの観測結果、及び青色 LED チップの GaN 層 E_2^H モードのラマンシフトのジャンクション温度依存性を示し、そのラマンシフト量から推定した蛍光樹脂が無い青色 LED チップの動作中のジャンクション温度について報告する。さらにレーザー入射光の照射パターンをビームエクパンダーと円柱レンズを用いてシート状に成形した場合の、蛍光樹脂が無い青色 LED モジュールを構成する複数チップからのラマンスペクトルを同時観測した結果、及び、GaN 層 E_2^H モードのラマンシフトのジャンクション温度依存性に基づいて、それらラマンシフト量から推定した複数チップの動作中のジャンクション温度の評

価結果について報告する。

2. 実験装置及び実験方法

実験に用いたパルスレーザーラマン散乱システムの概略を Fig.1 に示す。パルス Nd:YAG レーザー (Continuum PL8000) の第 2 高調波 (532 nm) で励起された色素レーザー (Continuum ND6000) より波長 632.816 nm (0.12 mJ、パルス幅 10 ns、繰り返し 10 Hz) の出射光を得る。さらにスペクトル純度を高くするため、レーザーラインフィルタ (Edmund, 68-879, FWHM: 3 nm, O.D.>4) を通過させ ASE をカットする。レーザー出射光は直線偏光板を通して球面レンズ ($f=100$ mm) に導かれ、LED モジュール表面上に収光させる。

蛍光樹脂無しの青色 LED モジュールは、Fig.2(a)に示すように、ヒーターブロック上に設置され、その温度を青色 LED モジュールとヒーターブロックの間に挿入配置した電気ヒーターと K 型熱電対 ($\phi 1$ mm) を用いた PID 制御によって、室温から 180°C まで変化させる。温度が一定に保たれた青色 LED モジュールのジャンクション部 (GaN 層) にレーザーを 22° の入射角で照射する。その場合のレーザーエネルギー、パルス幅、及び青色 LED モジュール表面の照射面積は、それぞれ、0.12 mJ、10 ns、 $\phi 1.0$ mm である。従って、青色 LED 表面のレーザーパワー密度は約 1.5×10^{10} W/m² となる。散乱光の一部を集光レンズ ($f=100$ mm)、結像レンズ ($f=-35$ mm)、ラマンエッジフィルタ (Edmund, 86-243, 632.8 nm, O.D.>6) を用いて、シングル分光器 (0.7 m, 1800 本/mm, F14) に導き、光電子増倍管 PMT (浜松ホトニクス, R1333) もしくはゲート機能付き ICCD カメラ (Princeton Instruments,

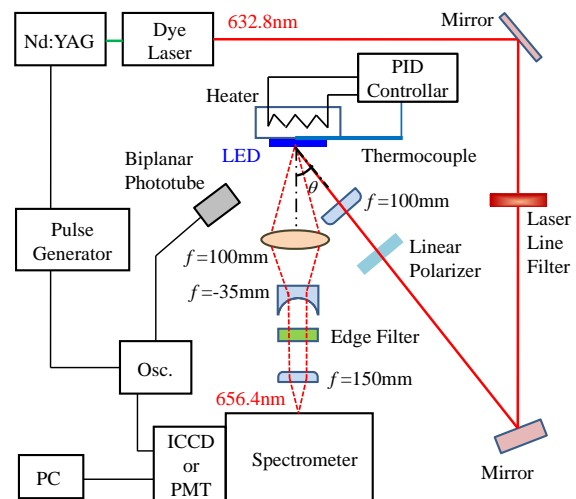


Fig.1 Experimental setup for estimation of junction temperature of LED using pulsed-laser Raman scattering.

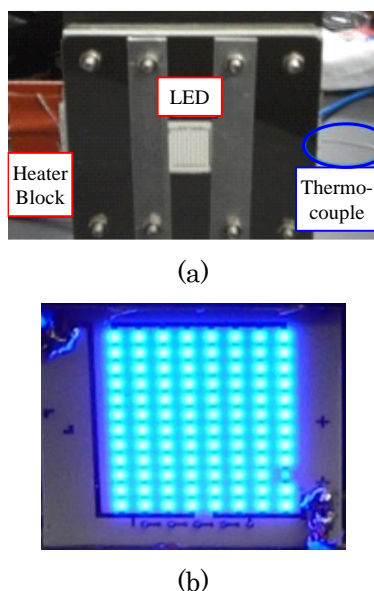


Fig.2 Photographs of (a) a phosphor-less blue-LED module and a heater block used in this study, and of (b) the LED module emitting blue light.

PI-MAX/UNIGEN II) を用いて構成した受光システムにより、GaN 層からの E_2^H ラマン信号 (656.4 nm) を検出する。計測には、PMT 及び ICCD、両方の場合において、フォトカウンティング法を用いると共に、エッジフィルタを使用することで、高強度のレイリー散乱光、及び青色 LED モジュールの放射光を十分にカットし、且つ 20000 ショットのレーザー照射の出力信号を積算することで、シングル分光器でも微弱なラマン散乱信号が検出可能なシステムを構築している。

実験では、まず初めに、GaN- E_2^H ラマンシフトの温度依存性を調べるために、青色 LED モジュールを動作しない状態 (Fig.2(a)) で、いくつかの温度に対するモジュール上のワンチップから GaN- E_2^H ラマン信号を観測した。そしてそのラマンシフトの温度依存性を用いて、動作中の蛍光樹脂の無い青色 LED モジュールの中央部に配置されたワンチップからのラマンシフトを観測し、そのジャンクション温度を評価した。

一方、複数チップを同時観測する場合は、Fig.3 に示すように、レーザーラインフィルタを通過させたレーザー射出光を、ビームエキスパンダーと円柱レンズ ($f=300$ mm) を用いてシート状の照射パターンに形成し、その後、直線偏光板を通してダイクロックミラー(DCM : cutoff wavelength of 638 nm)により LED モジュールに対し垂直に照射する。この場合、LED モジュールは正方形に配置された 96 個のチップから構成されており、このうち直線上に配置された数個のチップが、LED モジュール上にて約 0.8×15 mm² の矩形に形成されたレーザー入射光により照射される。複数チップ同時観測システムにおけるレーザーエネルギー、パルス幅、繰返し周期は、それぞれ、0.68 mJ、

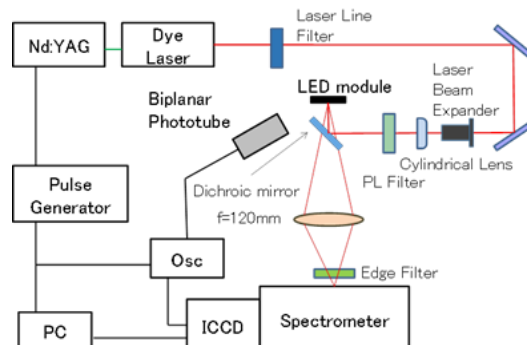


Fig.3. Schematic illustration of experimental setup for measuring junction temperature of LED using pulsed-laser Raman scattering.

10 ns、10 Hz であり、従って、青色 LED モジュール表面でのレーザーパワー密度は約 5.6×10^9 W/m² となる。散乱光の一部を集光レンズ ($f=120$ mm) とラマンエッジフィルタ (Edmund, 86-243, 632.8 nm, O.D.>6) を用いてシングル分光器 (1800 本/mm, F14, スリット幅と長さは、それぞれ 40 μ m 及び 20 mm) に導き、ICCD カメラ (Princeton Instruments, PI-MAX/UNIGEN II) を用いて構成した受光システムにより、複数チップの GaN 層からの E_2^H ラマン信号 (656.4 nm) を同時検出する。実験では、モジュール上の複数チップからの GaN- E_2^H ラマンシフトの温度依存性を同時に調べるために、青色 LED モジュールを動作しない状態において、モジュール上で直線上に配置された複数チップから GaN- E_2^H ラマン信号を、室温状態にて同時観測した。次に幾つかの動作電圧にてモジュールを動作 (発光) させた場合の GaN- E_2^H ラマンラマンシフトを観測し、その温度依存性より、複数チップのジャンクション温度の同時推定を試みた。

3. 実験結果及び考察

Fig.2(a)に示した蛍光樹脂無し青色 LED モジュールの各温度において得られた GaN- E_2^H ラマンスペクトル (ストークス線) を Fig.4 に示す。この場合、LED モジュールは点灯させていない。縦軸は ICCD によるレーザー 20000 ショットでの光子カウント数、横軸は温度 0 K 時の GaN- E_2^H ラマンピークからのシフト量を、室温 20°C において 66.5 μ m (Song 氏らの文献値より) として表している⁽¹⁵⁾。Fig.4 に示すように、LED の温度上昇とともに、ラマンピークの短波長側へのシフトと信号強度の減少が観測された。PMT 及び ICCD による測定によって得られた GaN- E_2^H ラマンシフトの温度依存性を、Liu 氏ら⁽¹⁾が顕微ラマン分光によって得た実験曲線とともに、Fig.5 に示す。Liu 氏らは、GaN 層のラマンシフト ω を温度 T の関数として次式

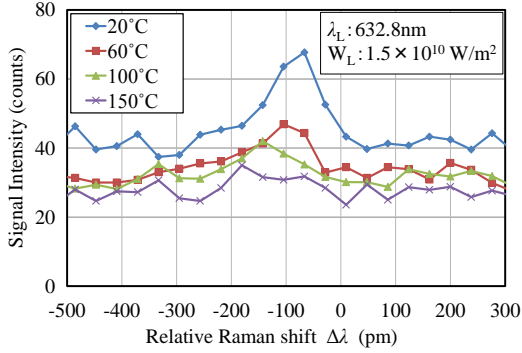


Fig.4. Raman spectra of the GaN- E_2^H from one chip on a phosphor-less blue-LED module observed at various temperatures. Temperature of the blue-LED was kept constant and the LED was not operating (no emission light).

のように表している。

$$\omega(T) = \omega_0 - \frac{A}{\exp(Bhc\omega_0 / \kappa_B T) - 1} \quad (1)$$

ここで ω_0 は 0 K におけるラマン光子周波数、 A と B はそれぞれフィッティングパラメータである⁽¹⁾。 E_2^H モードに対し、彼らは 90 K から 770 K の温度範囲において、 $\omega_0 = 568.2 \pm 0.2 \text{ cm}^{-1}$ 、 $A = 17.9 \pm 2.4 \text{ cm}^{-1}$ 、 $B = 0.99 \pm 0.08$ 、の値を示している。

このグラフに見られるように、本実験にて測定したラマンシフト量は、Lui 氏らの実験曲線と若干の差の範囲内でよく一致している。

ラマンシフトは GaN 層の上部層や下部層に依存する内部応力の影響を受ける^{(1),(15)}ので、その若干の差は、チップの内部応力か、あるいは、実際に計測される GaN 層と熱電対の計測箇所との温度差に起因するように思われるが、いまのところ詳細は分っていない。

次に、このパルスラマン散乱計測法を用いて、動作中の蛍光樹脂の無い青色 LED モジュールのジャンクション温度の測定を行った。ジャンクション温度はラマンシフト量だけでなく、ストークスとアンチストークスの強度比からも求めることが出来るが⁽²⁾、ここでは式(1)を用いて、ラマンピークのシフト量から算出した。Fig.2(b)に動作電圧 50 V における発光中の LED モジュールの様子を示す。このモジュール上のワンチップにレーザーを照射しラマンスペクトルを観測した。Fig.6 に観測された GaN- E_2^H ラマンスペクトルを、室温 25°C において動作していない場合の結果と共に示す。Fig.6 に示すように、Fig.4 の場合よりも強い青色 LED 発光があるにもかかわらず、明瞭にラマンスペクトルが観測されている。GaN- E_2^H ラマンシフトの温度依存性 (式(1)) から、動作電圧 50 V 及び 55 V の場合におけるジャンクション温度を求めると、それぞれ、 $100 \pm 20^\circ\text{C}$ 、 $190 \pm 20^\circ\text{C}$ となる。今回の実験では、主に分光器の性能とラマンピーク自身のスペクトル広がりに起因して、約 30 pm (0.67 cm^{-1}) の測定誤差が生じて

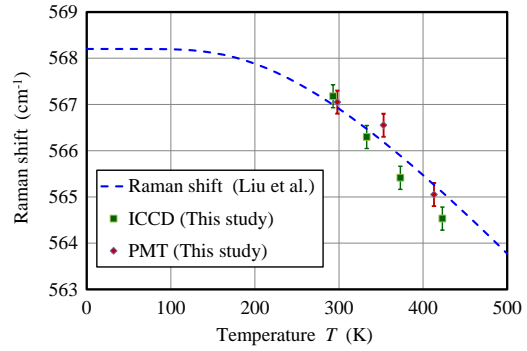


Fig.5 Temperature dependence of the Raman shift of the GaN- E_2^H of the blue-LED. The broken line shows the fitting curve of experimental data obtained by Liu *et al.* (1).

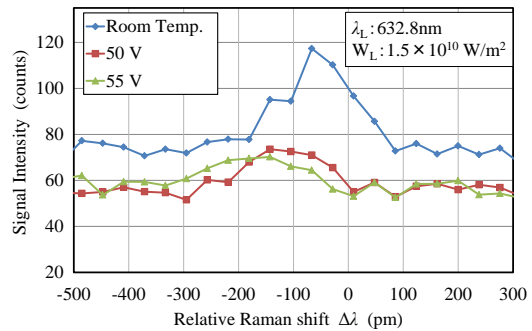


Fig.6 Raman spectra of the GaN- E_2^H observed at various operating voltages. The LED operating voltages are of 50 V and 55 V. Raman spectrum from the same LED without operation at room temperature is also shown.

いる。測定温度の精度 ($\pm 20^\circ\text{C}$) は、式(1)を用いて、300 K から 450 K における、ラマンシフトの温度勾配 66 K/cm^{-1} から算出した。

なお、白色 LED の場合、青色 LED のベアチップ上に蛍光体及び拡散材が混合された樹脂が塗布されているため、ラマン散乱信号の検出は難しい。この場合、蛍光体と拡散材を含む樹脂によって 2 つの問題が生じる。ひとつはレーザー励起によって蛍光体から放射される光 (蛍光) である。Nd:YAG レーザーの SHG (532 nm) を使用した予備実験では⁽¹⁰⁾、レーザー波長 (532 nm) とラマン波長 (549 nm) が蛍光樹脂の吸収、及び発光波長域にあるため、それらが大きな背景光となって観測された。今回の検討で、レーザー波長 632.8 nm 及びラマン波長 656.4 nm が共に蛍光樹脂の吸収、及び発光波長域から離れている波長域を選択した。その結果、蛍光体の吸収、及び励起発光が無視でき、Nd:YAG レーザー-SHG の場合と比較して、背景光の影響が大幅に低減された。もうひとつの問題は、樹脂内部でのレーザー励起光、及びラマン散乱光の拡散である。今回の実験で使用した波長帯域 (633-657 nm) では、励起レーザー光、及びラマン散乱光が、樹脂内部で 70% 程度に減衰することが観測された。この結果は、白色 LED の場合、励起レーザー光やラマン散乱

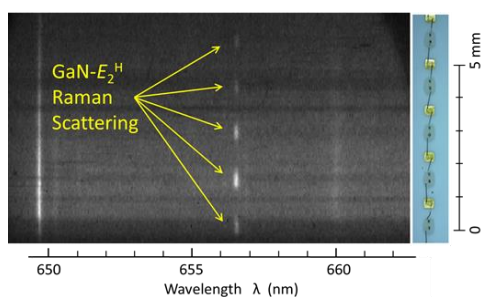


Fig.7 Image of Raman spectra obtained by the ICCD camera. A photograph of a part of the phosphor-less blue LED is put on the right for the confirmation of the position of the Raman image.

光がそれぞれ 70% に減少してラマン信号の強度が半分程度にはなるが、そのジャンクション温度の測定は十分可能であることを示唆する。最近の実験では、蛍光樹脂が塗布された白色 LED からのラマン信号の検出に成功している。

最後に、Fig.3 の実験装置及びその実験方法に関し、青色 LED モジュールの複数チップからの GaN- E_2^H ラマン信号を同時観測した結果、及び幾つかの動作電圧にてモジュールを動作（発光）させた場合の、GaN- E_2^H ラマンラマンシフトの観測結果と、その温度依存性より推定した複数チップのジャンクション温度の結果について述べる。

Fig.7 は、Fig.3 の実験装置において、モジュール上にて直線上に配置された複数チップから GaN- E_2^H ラマン信号を ICCD にて観測したイメージ画像を示す。画像の明暗が信号強度を意味する（明るいほど強度が強い）。写真の横方向の位置は波長に相当し、縦方向の位置は、励起レーザー光が照射された直線上に並んだチップの位置に対応する。チップの具体的な位置を明確にするため、イメージ画像の右側に、直線上に配置されたチップの写真を示している。

Fig.7 に示すように、波長 649.5 nm 付近で、比較的強い信号画像が、レーザーが照射された全ての範囲において、直線状に観測されている。これはモジュール基板を構成するアルミナ ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) に起因するラマンピークである。一方、波長 656.4 nm 付近では、LED のチップが存在する位置だけに、ラマン散乱信号画像が観測される。それ故、これらのラマン散乱信号画像は、GaN の E_2^H モードに起因するものと判断できる。

Fig.8 に Fig.7 で観測されたラマン散乱信号画像から得られた各チップの GaN- E_2^H 散乱スペクトルを示す。Fig.8 の縦軸は ICCD からの相対的な信号強度、横軸は室温状態からの GaN- E_2^H ラマンピークの相対的なシフト量を示す。これらのスペクトルの強度は各チップのサイズに対応する ICCD の全てのセルからの信号強度を合算して求めた。Fig.8 に示すように、複数チ

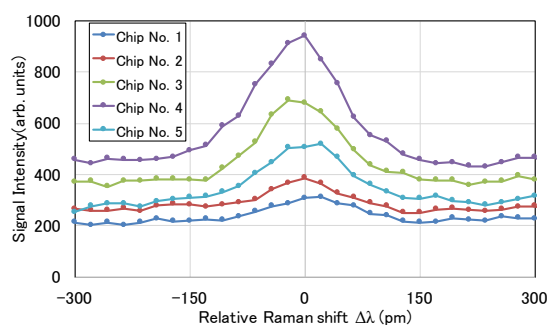


Fig.8 Raman spectra of the GaN- E_2^H mode observed at each LED chip in the phosphor-less blue-LED.

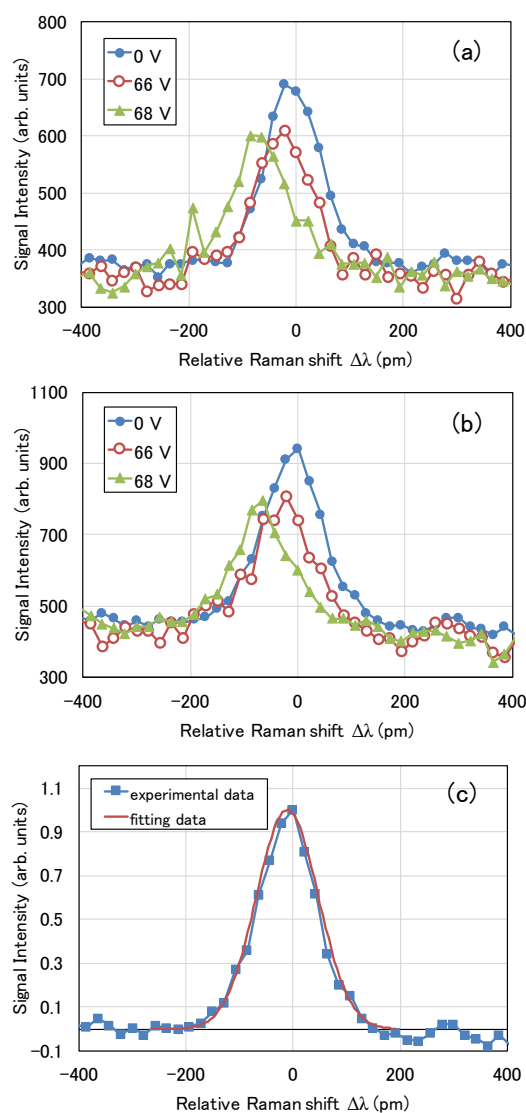


Fig.9 Raman spectra of (a) the chip No.3 and (b) the chip No.4 in the blue-LED operated at various applied voltages, and (c) result of the line shape-fitting analysis.

チップからのラマンスペクトルが同時に観測されている。各チップからの信号強度に違いがあるのは、照射レーザーパワー密度の空間分布が不均一なことに起因する。

次に、このパルスラマン散乱計測法を用いて、各チップのジャンクション温度の測定を行った。ジャンクション温度の推定は、先のワンチップにける温度推定と同様に、式(1)を用いて、ラマンピークのシフト量から算出した。

Fig.9(a)及び Fig.9(b)に、Fig.8 に示したチップ No.3 及び No.4 について、幾つかの動作電圧における発光中の GaN- E_2^H ラマンスペクトルを同時に観測した結果を示す。図中には、室温状態で動作させていない場合に観測したラマンスペクトルも示している。Fig.9(a) 及び Fig.9(b)に示すように、LED の強い発光（青色）がある状態にも関わらず、チップ No.3 及び No.4 のラマンスペクトルが同時に観測されている。それぞれの場において、ラマン散乱のピーク波長は、Fig.9(c) に示すように、装置関数（スリット幅 40 μm に対して 43 pm）と、Song 氏ら⁽¹⁵⁾によって与えられた室温状態におけるラマンスペクトル幅から求めたガウス関数とのコンボリューションによるフィッティング解析から推定した。求めたピーク波長により、式(1)で与えられるラマンシフトの温度依存性から、チップ No.3 の動作電圧 66 V 及び 68 V のジャンクション温度は、それぞれ $53 \pm 20^\circ\text{C}$ 及び $127 \pm 20^\circ\text{C}$ と推定される。同様にチップ No.4 の動作電圧 66 V 及び 68 V のジャンクション温度の推定値は、それぞれ $53 \pm 20^\circ\text{C}$ 及び $119 \pm 20^\circ\text{C}$ となる。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。

4. 結 言

パルスレーザーラマン散乱法によって蛍光樹脂が無い青色 LED モジュールのワンチップのジャンクション温度を計測した。LED の GaN- E_2^H ラマンシフト量が温度に依存し、迷光やレイリー散乱、LED 自身の放射光があるにもかかわらず、そのシフト量から動作中の LED のジャンクション温度を計測できることを示した。

更にビームエクspanderを用いて矩形状に成形された励起レーザー光を複数の LED チップに照射することで、複数チップからの GaN- E_2^H ラマン信号を同時検出し、そのシフト量から動作中の複数チップのジャンクション温度を同時計測できることを示した。本研究で提案するパルスレーザーラマン散乱法は、動作中の LED モジュールのジャンクション温度をリモートで2次元的に同時計測可能なシステムの一つとして期待できる。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS科研費 26420237の助成を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) Liu M S, Bursill L A, Prawer S, Nugent K W (1999) Temperature dependence of Raman scattering in single crystal GaN films. *Appl Phys Lett* 74:3125-3127
- (2) Ahmad I, Kasisomayajula V, Song D Y, Tian L, Berg J M, Holtz M (2006) Self-heating in a GaN based heterostructure field effect transistor: Ultraviolet and visible Raman measurements and simulations. *J Appl Phys* 100:113718
- (3) Kuball M, Riedel G J, Pomeroy J W, Sarua A, Uren M J, Martin T, Hilton K P, Maclean J O, Wallis D J (2007) Time-Resolved Temperature Measurement of AlGaIn/GaN Electronic Devices Using Micro-Raman Spectroscopy. *IEEE Electr Device Lett* 28:86-89
- (4) Senawiratne J, Li Y, Zhu M, Xia Y, Zhao W, Detchprohm T, Chatterjee A, Plawsky J L, Wetzel C (2008) Junction Temperature Measurements and Thermal Modeling of GaInN/GaN Quantum Well Light-Emitting Diodes. *J Electron Mater* 37:607-610
- (5) Kuball M, Pomeroy J W, Rajasingam S, Sarua A, Uren M J, Martin T, Lell A, Härle V (2005) High spatial resolution micro-Raman temperature measurements of nitride devices (FETs and light emitters). *Phys Stat Sol (a)* 202:824-831
- (6) Xi Y, Schuberta E F (2004) Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method. *Appl Phys Lett* 85:2163-2165
- (7) Xi Y, Xi J Q, Gessmann T, Shah J M, Kim J K, Schubert E F, Fischer A J, Crawford M H, Bogart K H A, Allerman A A (2005) Junction and carrier temperature measurements in deep-ultraviolet light-emitting diodes using three different methods. *Appl Phys Lett* 86:031907
- (8) Sarua A, Ji H, Kuball M, Uren M J, Martin T, Hilton K P, Balmer R S (2006) Integrated Micro-Raman/Infrared Thermography Probe for Monitoring of Self-Heating in AlGaIn/GaN Transistor Structures. *IEEE Trans Electr Device* 53: 2438-2447
- (9) Hwang W J, Lee T H, Kim L, Shin M W (2004) Determination of junction temperature and thermal resistance in the GaN-based LEDs using direct temperature measurement. *Phys Stat Sol (c)* 1:2429-2432
- (10) Fukuyama T, Kai M, Manabe Y, Yamagata Y, Tomita K (2013) In: Proceedings of the 66th Joint conference of Electrical, Electronics and Information Engineers in Kyushu, Kumamoto University, Kumamoto, Japan, 24-25 Sep 2013, 11-2A-02 (in Japanese)
- (11) Yamagata Y, Horiuchi M, Tomita K, Manabe Y, (2014) In: Proceedings of the 67th Joint conference of Electrical, Electronics and Information Engineers in Kyushu, Kagoshima University, Kagoshima, Japan, 18-19 Sep 2014, 12-1A-01 (in

- Japanese)
- (12) Yamagata Y, Tomita K, Horiuchi M, Manabe Y, (2014) Proceedings of 2014 Annual Conference of IEI Japan, Saitama University, Saitama, Japan, 4-6 Sep. 2014, 9-9 (in Japanese)
- (13) Horiuchi M, Yamagata Y, Tsutsumi S, Tomita K, Manabe Y (2015) Development of junction temperature estimation system for light-emitting LED using pulsed-laser Raman scattering. *Journal of Solid State Lighting* 2:7 (2015) 2196-1107
- (14) Tsutsumi S, Yamagata Y, Tomita K, Horiuchi M, Manabe Y, Proc. 68th Joint conf. Electr. Electron. Inf. Engr. Kyushu (Fukuoka, Japan, Sep. 26-27, 2015), 13-1P-04 (in Japanese)
- (15) Song D Y, Basavaraj M, Nikishin S A, Holtz M (2006) The influence of phonons on the optical properties of GaN. *J App Phys* 100:113504