

Eu 添加 GaN における効率 Droop 現象のレート方程式による理論解析

Theoretical analysis of efficiency droop in Eu-doped GaN by rate equation

阪大院工¹, 立命館大総研² ◦森 恵人¹, 市川 修平¹, 藤原 康文², 小島 一信¹Osaka Univ.¹, Ritsumeikan Univ.²◦Keito Mori-Tamamura¹, Shuhei Ichikawa¹, Yasufumi Fujiwara², Kazunobu Kojima¹E-mail: mori@sfm.eei.eng.osaka-u.ac.jp

希土類元素 Eu を添加した GaN (GaN: Eu) は色純度の高い赤色発光を有しており、GaN が母体であることを活かして、InGaN 系青色・緑色 LED と組み合わせた、モノリシック LED も実現している[1]。私たちは、GaN: Eu ベースの半導体レーザの実現を目指しており、実際に自然放出増幅光を観測している[2]。GaN: Eu 系 LED において、大電流領域において発光効率が低下するため[3]、レーザ発振のボトルネックの一つになっていると考えられる。この効率低下の原因について、Eu の遷移寿命が長いことによる、Eu 励起準位の飽和が挙げられているが[3]、Eu 発光中心に焦点を当てているものが多い。

そこで、本研究では、GaN: Eu の PL 強度・減衰曲線の励起強度依存性を測定し、母体の GaN も含めたレート方程式を構築し、実験結果を再現することで、droop を律速しているパラメータやその抑制方法の探索を行った。実験では、MOVPE 法によって成長されたサファイア基板上の厚さ 300 nm の GaN: Eu をサンプルに用いた。励起光源として 320 nm の CW-DPSS レーザを用い、AOM でパルス幅 1.25 ms、繰り返し 400 Hz に変調した。レーザ光をレンズでサンプル表面に焦点を合わせ、そのスポット径は約 100 μm であった。図 1 に、PL 効率 (PL 積分強度/励起強度) と立ち上がり寿命 τ_{rise} ・減衰寿命 τ_{decay} を示す。PL 効率が低下している領域で τ_{decay} は一定であり、これは、励起強度の増大に伴うバックトランスファーは起きていないことを表している。メイン発光の 621 nm (5D_0 - 7F_2 遷移) 以外の発光の増大も観測されなかったことから、効率低下の要因はこれらにはないと考えられる。そこで、GaN のギャップ中にある、Eu へとエネルギーを輸送するための準位の飽和が原因であると仮定して、以下のレート方程式を立てた。

$$\text{GaN 母体: } \frac{dn_{\text{CB}}}{dt} = G - \tau_{\text{GaN}}^{-1} n_{\text{CB}} - \tau_{\text{cap}}^{-1} (1 - n_{\text{cap}}/D_{\text{Eu}}) n_{\text{CB}}, \quad \frac{dn_{\text{cap}}}{dt} = \tau_{\text{cap}}^{-1} (1 - n_{\text{cap}}/D_{\text{Eu}}) n_{\text{CB}} - \tau_{\text{trans}}^{-1} n_{\text{cap}},$$

$$\text{Eu 発光中心: } \frac{dn_{\text{exc}}}{dt} = \tau_{\text{trans}}^{-1} n_{\text{cap}} - \tau_{\text{relax}}^{-1} n_{\text{exc}}, \quad n_{\text{ground}} = D_{\text{Eu}} - n_{\text{exc}},$$

ここで、 n_{CB} , n_{cap} , n_{exc} , n_{ground} はそれぞれ、伝導帯・捕獲準位にいる励起子密度、励起・基底状態にいる Eu^{3+} 密度、 D_{Eu} はエネルギー輸送可能な捕獲準位の密度、 G , τ_{GaN} , τ_{cap} , τ_{trans} , τ_{relax} はそれぞれ、励起子生成速度、GaN の緩和寿命、捕獲寿命、輸送寿命、Eu の緩和寿命を表す。式中の $(1 - n_{\text{cap}}/D_{\text{Eu}})$ は、励起強度(注入電流)を高くしていくと捕獲準位が充填することを意味する。計算において、励起条件は実験と合わせ、各寿命は文献値を用い、 D_{Eu} のみをフィッティングパラメータとしている。以上の式から PL 強度を算出し、実験結果と比較したものを図 2 に示す。これを見ると、自由度 1 の式で実験結果を比較的良くに再現できており、輸送可能な捕獲準位の密度が効率 droop を律速していることがわかる。

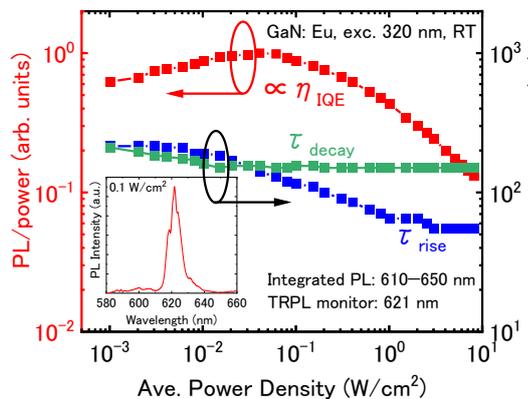


Fig. 1 An excitation energy density dependence of PL efficiency, rise time, and decay time in GaN:Eu. A typical PL spectrum is also shown.

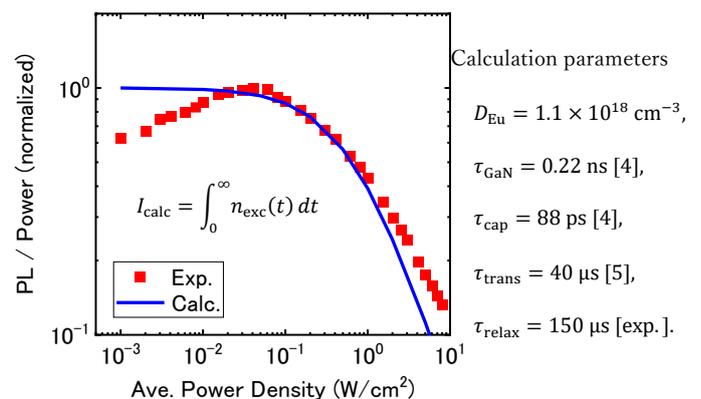


Fig. 2 A comparison of experimental data (red plots) and theoretical calculation results (blue curve) for PL efficiency as a function of excitation energy density in GaN:Eu.

謝辞 本研究の一部は、科研費(No. 23H05449)の支援を受けて行われました。

文献 [1] S. Ichikawa *et al.*, *APEX* **14**, 031008 (2021). [2] A. Takeo *et al.*, *JJAP* **60**, 120905 (2021).

[3] B. Mitchell *et al.*, *JAP* **123**, 160901 (2018). [4] D. Timmerman *et al.*, *PRB* **101**, 245306 (2020).

[5] A. J. Steckl *et al.*, *Materials Today* **10**, 20 (2007).