

## 赤色発光 GaN LED が発光するまでを追跡する新手法

表界面構造物性ユニット 表面物理グループ 石井 真史

### 1. 背景・目的

Eu 添加 GaN (GaN:Eu) は、Eu 不純物の 4f-4f 発光遷移を使って赤色発光する GaN ベースの材料であり、近年実用化に向けた研究が進んでいる。実際、GaN:Eu を使ってサブ mW の出力を持つ赤色 LED が既に試作されており[1]、良く知られた InGaN 系の青・緑色 LED と組み合わせれば三原色が揃う。すなわち、GaN:Eu で更に高い出力が実現できれば GaN 半導体をベースにしたモノリシックディスプレイが作製できる。しかし GaN:Eu LED は従来の LED と異なり、低濃度の Eu が発光中心であるため、注入電荷が材料を貫通し、「光らなかつた」過程[2]として終わるばかりか、熱的なダメージも引き起こす。ここでは本プロジェクト内で開発された新たなアプローチ、GaN:Eu LED をパルス駆動し、注入電荷を往復運動させることで貫通を減らす方法と共に、この動的な応答を赤色発光機構の解明に発展させた成果の一部を紹介する。

### 2. 研究成果

今回使用した赤色 LED の構造は、従来の LED に良く似ているが、GaN の pn 接合の間に発光層 GaN:Eu を挟み込んでいる点が決定的かつ重要なポイントである。ここに信号発生器 (GW Instek, AFG-2005) で矩形波を印加する。適当な周波数を設定すれば、注入電荷は GaN:Eu 発光層を貫通する前に向きを変え、往復運動する。pn 接合は 0 バイアスでポテンシャル障壁を持つから、矩形波は実用上有利なユニポーラで良い。発光強度を CCD カメラで計測し、最大発光強度が得られる周波数を特定するとともに、周波数依存性を分光分析 (Pulse-driven emission spectroscopy, PDES)

[2]する。Fig. 1 は、パルス電圧  $V_{pls} = 2.9 \text{ V}$  の PDES スペクトル (発光強度のパルス周波数依存性) を示す。この電圧はほぼ発光の閾値に相当する。周波数の増加とともに発光強度が増大し、10kHz 程度でパルス駆動によって DC 駆動 (図の低周波極限) より発光効率が約 2 倍に達する事がわかる。この共振周波数  $f_r$  は GaN:Eu 発光層の電気的な応答時定数  $\tau = CR$  (C:静電容量、R:抵抗) に一致する。 $f_r$  を越えた周波数では、往復運動の振幅が大きいうちは、電荷は散在する Eu を跨いで動くものの (図中 L 領域)、振幅が小さくなると隣接する Eu の間を往復し始め発光強度は急速に下がる (同 S 領域)。発光効率の改善は  $V_{pls}$  が高くなるに従って進み、20 mA の通常の注入条件では約 3 倍に達した。

ここで重要なのは、この PDES のスペクトル形状である。上述の Fig.1 の説明に従えば、明らかにその形状には Eu の電荷捕獲特性が強く反映される。GaN:Eu の別の問題点として、少なくとも 8 種類の発光中心が混在し、Eu の 4f-4f 遷移の利点である単色性 (半値幅の狭い発光) を阻害する点がある。さらに、これらの発光中心は異なる電荷捕獲特性を持つことを考えると、電荷を捕獲し易い発光中心を選択的に形成することが、高出力 LED を作製する上で必要なことは明らかである。そこで PDES を拡

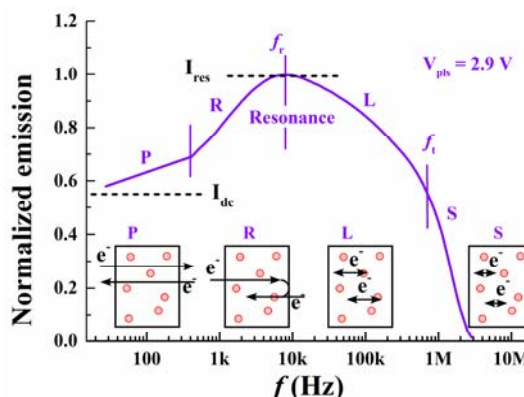


Fig. 1 PDES スペクトルとその形状を説明するモデル

張し、検出する発光波長を選択する事で、発光中心毎に捕獲特性を知る「サイト選択型 PDES」を開発し、それを駆使することで各発光中心に関する新しい知見を得た[3]。

Fig. 2 にサイト選択型 PDES の実験装置を示す。測定原理が似ている PLE の装置を流用しているが、励起波長の代わりに、LED を駆動する矩形波の周波数  $f$  を変え、各  $f$  における発光スペクトルをスペクトロメータで取得する。この測定手順は、PLE の電子デバイス評価法への拡張を意味している。

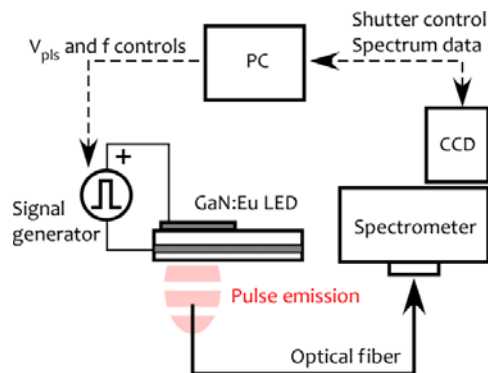


Fig. 2 サイト選択型 PDES 実験装置

Fig. 3 に GaN:Eu LED (Eu 濃度 :  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) のサイト選択型 PDES のスペクトル例を示す。横軸が周波数  $f$ 、縦軸が GaN:Eu LED で主要な二つの発光中心からの発光強度 (それぞれの光子エネルギーは実線 1.996 eV と破線 2.007 eV) である。図に示す通り PDES 周波数スペクトルには明確な違いがあり、これらの発光中心の電荷捕獲特性の違いを表している。詳細な解析により(1) 電荷を捕獲し易い周波数帯が、発光中心によって異なること、(2) この差異が挿入図に示す Eu の局所ポテンシャルの広がりの違いで説明できること、(3)ポテンシャル広がり、周波数を使って定量化し、同時に様々な LED の用途に対する適性を議論できること、が明らかになった[3]。

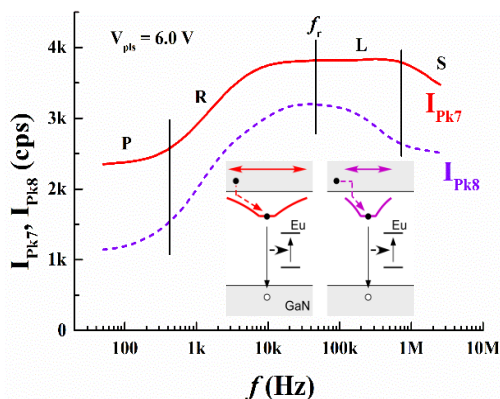


Fig. 3 サイト選択型 PDES の周波数スペクトル

### 3. 展望

ここで述べた PDES は、各発光中心の電子状態の選択的な分析に更に拡張される[4]。これは、Fig.3 で二点のみ観測した発光波長を連続的な観測に変え、三次元マッピングを行うことで実現される。参考のために Fig.4 に三次元マッピングの例を示す。

こうした、今回開発された PDES の幅広い活用が、最終的に赤色 GaN:Eu の実用化、すなわち GaN モノリシックディスプレイの実現につながるものと期待される。

### 参考文献

[1] Y. Fujiwara and V. Dierolf, Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 **53**, 05FA13 (2014).  
 [2] 石井真史、応用物理 **85**, 223 (2016).  
 [3] M. Ishii *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 171903 (2014).  
 [4] M. Ishii *et al.*, J. Appl. Phys. **117**, 155307 (2015).  
 [5] M. Ishii *et al.*, Appl. Phys. Lett. **107**, 082106 (2015).

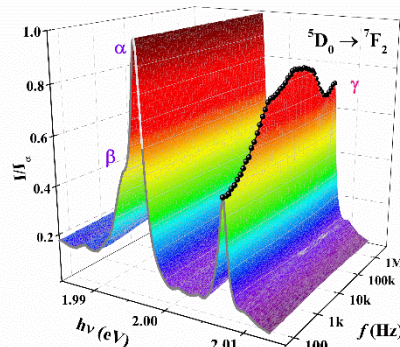


Fig. 4 PDES による GaN:Eu LED の  $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$  発光の三次元マッピング