

高品質 GaN 単結晶における 自由励起子とドナー束縛励起子の発光ダイナミクス

Radiation dynamics of free and donor-bound excitons in high-quality bulk GaN

東北大多元研¹, 三菱化学(株)² ◦小島一信¹, 齊藤真^{1,2}, 池田宏隆², 藤戸健史², 秩父重英¹

IMRAM-Tohoku Univ.¹ and Mitsubishi Chemical Corporation²

◦K. Kojima¹, M. Saito^{1,2}, H. Ikeda², K. Fujito², and S. F. Chichibu¹

E-mail: kkojima@m.tohoku.ac.jp

【はじめに】酸性鉍化剤を用いたアモノサーマル (AT) 法により合成した GaN 単結晶に、ハイドライド気相エピタキシャル成長 (HVPE) 法で成長された単結晶 GaN [1]は、貫通転位や積層欠陥、点欠陥の密度が極めて低いため、パワーデバイス向けの基板用途はもちろんのこと、GaN の純粋な光物性を評価する場としても理想的である。また、 m 面などの非 c 面 GaN の成長においては、一般的に不純物の取り込みが多く、特にドナー性の不純物の詳細な評価は重要である。本研究では、AT 法や HVPE 法、それらの複合によって成長させた高品質 GaN 単結晶における自由励起子 (FX) とドナー束縛励起子 (DBE) の発光ダイナミクスを評価した結果について議論する。

【試料構造と評価方法】本研究では、SCAATTM-GaN [2]上に HVPE 法でホモエピタキシャル成長させた GaN 単結晶や、SCAATTM-GaN そのものを用いた。光学特性は、フォトルミネセンス (PL) 法、カソードルミネセンス法および時間分解 PL 法を用いて行った。光学評価にあたって、励起光や電子線の集光スポットの直径を 0.1 mm 程度としたため、集光スポット内の貫通転位の数は 10^0 個程度 (貫通転位密度が 10^4 cm^{-2} の場合) と、測定領域内の貫通転位は極めて少ないといえる。

【理論モデル】実験結果を解釈するため、簡単な理論モデルを立ててレート方程式を解くことにより系のダイナミクスを表現した。モデルでは、光励起後ただちに (少なくとも測定系の時間分解能である約 10 ps より速く) FX が形成され、それがドナー不純物に捕獲寿命 $\tau_{\text{TR}}^{\text{D}}$ で捕まり、FX と DBE がそれぞれの輻射再結合寿命で光子を生成し消滅する、という描像を基本とした。このため、系がパルス励起された際、FX の発光と DBE の発光の間に、 $\tau_{\text{TR}}^{\text{D}}$ 程度の遅れが発生し、FX の減衰は輻射再結合寿命ではなく、 $\tau_{\text{TR}}^{\text{D}}$ に支配されることが予想される。

【結果】図 1 に FX と DBE の 10 K における発光減衰曲線の典型例を示す。どちらの減衰も、ほぼ単一の寿命 (それぞれ約 60 ps および 120 ps) を有し、FX に比べ DBE は比較的長い減衰寿命を示した。また、上記の予想通り、FX と DBE の間には若干の立ち上がりの遅れ Δt (図 1 の場合は約 40 ps) が存在している。これらの結果は文献[3]と矛盾しない。また、実験的に得られた DBE と FX の発光ピーク強度の比 R は、 Δt が短いほど大きくなる傾向があった。この結果は、本研究で用いた理論モデルに焼き直すと $\Delta t \sim \tau_{\text{TR}}^{\text{D}}$ が短いほど FX が DBE に転じやすくなるため DBE の発光が強くなり、その結果 R が大きくなることに相当する。また、実験事実と理論計算の結果を定量的に一致させるには、FX の輻射再結合寿命が 1.2 ns 程度になる必要があることもわかった。比較的単純なモデルで系の発光ダイナミクスが良く再現できたことは、SCAATTM-GaN、およびその上に成長された HVPE-GaN の結晶品質が極めて良いことを裏付けるものであると考えられる。講演では、異なる不純物濃度を持つ単結晶 GaN の評価結果についても議論する。

【謝辞】本研究の一部は、NEDO の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) および科研費 (若手研究 (A)) により実施された。

【参考文献】 [1] 小島, 秩父 他, 2015 年秋季応用物理学会, [2] Mikawa, *et al.*, *Proc. SPIE* **9363**, 936302 (2015), [3] 古澤, 秩父 他, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 052108 (2013).

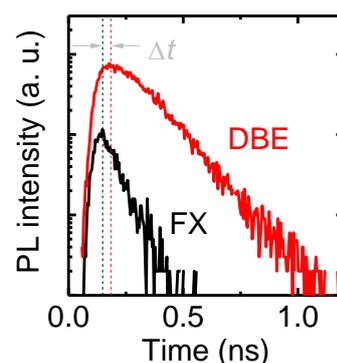


図 1 10K における FX と DBE の発光減衰曲線。