

# 輻射性励起子減衰寿命の温度依存性への非輻射再結合の影響

## Effect of nonradiative recombination on radiative decay time of exciton population

千葉大工 ○(B)地崎 匡哉, 大木 健輔, 馬 蓓, 森田 健, 石谷 善博\*

Chiba Univ., ○Masaya Chizaki, Kensuke Oki, Bei Ma, Ken Morita, and Yoshihiro Ishitani\*

E-mail: \*Ishitani@faculty.chiba-u.jp

GaN の励起子発光は室温において観測されているが[1], 150 K 以上の温度領域で励起子によるレーザ発振が確認できないことが報告されている[2]。一方で励起子ポラリトンと電子正孔プラズマによる室温での2段階の発振が報告されており[3], 励起子の安定的存在条件は不明確である。励起子安定性評価には, 非熱平衡系励起子ダイナミクスの理解が必要と考えられる。我々は, 水素プラズマのダイナミクスを記述する衝突輻射(CR)モデルを参考にして, フォノンとの相互作用や輻射再結合による遷移過程を加えた「フォノン・励起子・輻射(PXR)モデル」による解析を行った[4]。

主量子数 $n = 1$ 自由励起子(FX1)の輻射再結合寿命 $\tau_{\text{rec}}(1)$ は, 温度 $T$ の $3/2$ 乗に比例することが理論的に示されているが[5], 温度上昇に伴い統計的重率の高い $n > 1$ の準位や解離した連続状態にポピュレーションが分布することを考えると $T^{3/2}$ 則の破綻が予測される。PXR モデルによる FX1 の減衰時間 $\tau_d(1)$ の計算では $\tau_d(1) \neq \tau_{\text{rec}}(1)$ であり,  $\tau_d(1)$ は $T^{3/2}$ に比例しないことが示された[4]。一方で実験的観測では減衰時間 $\tau_d(1)$ から算出した輻射再結合寿命 $\tau_r(1)$ が,  $T^{3/2}$ に比例する例が報告されている[6]。実際の結晶には多数の欠陥・不純物によって非輻射再結合が起こるので, 実験で測定された結果には励起子の束縛や非輻射再結合による効果が現れている可能性がある。また非輻射再結合はデバイスの発光効率を低下させる原因でもあり, その効果を考えることは重要である。本研究では PXR モデルに非輻射再結合過程を加え, 励起子の分布や減衰時間への影響を考察した。非輻射再結合過程のモデルとして, 深い準位への励起子または自由キャリアの捕獲と再結合を考え, 捕獲速度係数を変化させた。また非輻射再結合によって, 実験で解析した輻射再結合寿命 $\tau_r(1)$ が温度 $T^{3/2}$ に比例することがあり得るかについても考察した。非輻射再結合により減衰時間 $\tau_d(1)$ に変化が現れたのは, 速度係数の大きさがフォノンによる励起子生成または励起子解離の速度係数の $10^{-2}$ 倍以上に大きくなったときであり, ある励起子非輻射再結合速度 $P_{\text{nr}}^X$ で $\tau_r(1)$ が算出方法によっては Fig. 1 のように $T^{3/2}$ に比例する場合があった。ここで,  $\tau_{r1}(1)$ の場合は内部量子効率 $\eta = (\text{発光光子密度})/(\text{全励起密度})$ として求め,  $\tau_{r2}(1)$ は $\eta$ の分母を低温での発光光子密度として求めている。 $\tau_{r3}(1)$ は励起子輻射再結合速度係数を $P_r^X$ とし,  $\eta = P_r^X/(P_r^X + P_{\text{nr}}^X)$ として求めた。 $\tau_{r4}(\text{tot})$ は全キャリアの減衰時間 $\tau_d(\text{tot})$ から,  $\tau_{r1}(1)$ と同様の方法で計算した。

本研究は科研費 16H06425 および 17H02772 により行われた。

### 参考文献

- [1] S. Chichibu, *et al.*, J. Appl. Phys. **79**, 2784 (1996)
- [2] S. Bidnyk, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **74**, 1 (1999)
- [3] P. Bhattacharya, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 236802 (2014)
- [4] K. Oki, *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 205204 (2017)
- [5] A. Dmitriev, *et al.*, J. Appl. Phys. **86**, 3241 (1999)
- [6] C. Hauswald, *et al.*, Phys. Rev. B **90**, 165304 (2014)

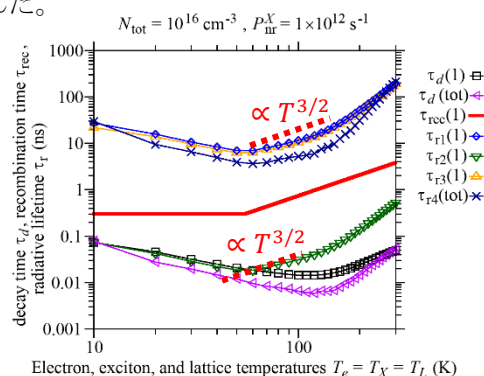


Fig. 1  $\tau_d, \tau_r$  obtained by PXR model taking into account nonradiative excitonic recombination processes.