

フォノン・励起子・輻射モデルによる励起子発光速度の決定機構の解析

Analysis of mechanism of exciton emission rate by phononic-excitonic-radiative model

千葉大院工 ○(M1)地崎 匡哉, 大木 健輔, 石谷 善博*

Chiba Univ., °(M1)Masaya Chizaki, Kensuke Oki, Yoshihiro Ishitani*

E-mail: *ishitani@faculty.chiba-u.jp

1S 励起子は主要な発光源の 1 つであるが, そのライフタイムの輻射成分 $\tau_{\text{rad}}(1)$ の温度依存性は様々報告されており, その決定機構は明らかになっていない。 k 空間での 1S 励起子のみの分布を考えた場合, $\tau_{\text{rad}}(1)$ はバルク結晶で $T^{3/2}$ に比例することが報告されている[1]。しかし, 励起子のポピュレーションは様々な主量子数 n の状態と自由キャリア状態に分布する。実験的報告では, $\tau_{\text{rad}}(1)$ の温度依存性について $T^{3/2}$ やそれよりも大きな T のべき数が報告されている[2, 3]。実験の様々な傾向を理論的計算によって特徴付けるためには, 半導体内のフォノン・電子・励起子の全てのエネルギー種と, それらの相互作用を考慮する必要がある。そこで我々はフォノン・励起子・輻射 (PXR) モデルを構築し, GaN の理想的な結晶では輻射寿命の温度依存性の T のべき乗は $3/2$ よりも大きいことを明らかにした[4]。本研究では, 残留電子と, 温度上昇に伴うブロードニングによる主量子数最大値 n_{max} の変化, および非輻射過程の, $\tau_{\text{rad}}(1)$ の温度依存性に対する影響を調べた。

残留電子は密度 N_D , 活性化エネルギー 16 meV の Si から供給し, 残留電子密度はサハの式から求めた。 $n_{\text{max}} = 4$, 励起密度 $N_{\text{exc}} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ として, N_D を 0 から $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ まで増加させると 1S 励起子密度が増加した。その結果, Fig. 1 のように $\tau_{\text{rad}}(1)$ が減少し, 60–100 K での $\tau_{\text{rad}}(1)$ の T 依存性は $T^{4.3}$ から $T^{3.0}$ に変化した, いくつかの実験の報告とは異なり, T のべき数は $3/2$ より大きくなった。次に, $N_D = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ において, 考慮する励起子の主量子数の最大値 n_{max} を変化した結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 のように n_{max} が減少すると $\tau_{\text{rad}}(1)$ は減少し, $n_{\text{max}} = 1$ のとき, 60–100 K での $\tau_{\text{rad}}(1)$ の T のべき乗は 1.7 になった。さらに, 非輻射過程の種類による違いを調べ, $\tau_{\text{rad}}(1)$ の非輻射過程への依存性を示した。我々は理論計算によって残留電子, n_{max} の減少, および非輻射過程のそれぞれの効果を取り入れ, 各々の $\tau_{\text{rad}}(1)$ と輻射速度に対する効果の特徴を示した。また, ライフタイムが減少したことから冷却過程の存在が考えられるが, これはフォノンの拡散によって起こっていると考えられる。本研究は科研費 16H06425 により行われた。

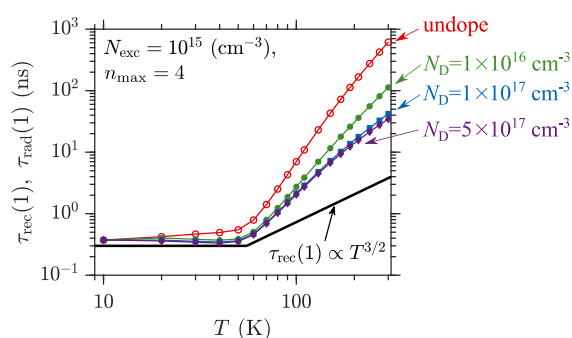


Fig. 1. Lifetime of 1S exciton. $\tau_{\text{rec}}(1)$ is the inverse of the recombination probability. Symbols denote $\tau_{\text{rad}}(1)$ obtained from PXR models with and without doping. n_{max} is 4.

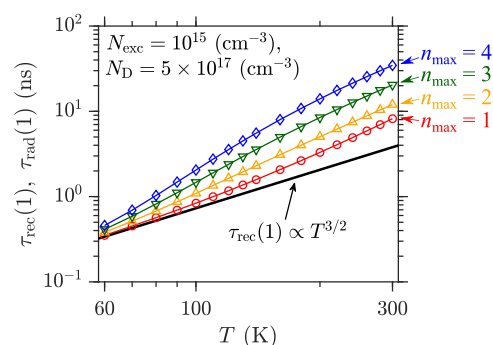


Fig. 2. Lifetime of 1S exciton. Symbols denote $\tau_{\text{rad}}(1)$ obtained from PXR models for $n_{\text{max}} = 1, 2, 3$, and 4. N_D is $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

参考文献

- [1] A. Dmitriev and A. Oruzhenikov, J. Appl. Phys. **86**, 3241 (1999).
- [2] J. S. Im *et al.*, Appl. Phys. Lett. **70**, 631 (1997).
- [3] S. F. Chichibu *et al.*, J. Appl. Phys. **123**, 161413 (2018).
- [4] K. Oki, B. Ma and Y. Ishitani, Phys. Rev. B **96**, 205204 (2017).