

励起子輻射速度の温度依存性の起源の フォノン・励起子・輻射モデルによる解析

Origin of temperature dependence of exciton radiative lifetime analyzed by
phononic-excitonic-radiative model

千葉大院工 ○(M2)地崎 匡哉, 大木 健輔, 石谷 善博

Chiba Univ., ○(M2)Masaya Chizaki, Kensuke Oki, Yoshihiro Ishitani

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

1S 励起子は主量子数 n が 2 以上の励起子状態や自由キャリア状態に比べて輻射再結合確率が高く主要な発光源である。紫外光の波長の範囲で、発光波長が短くなるほど発光効率 η が低くなるのが AlGaIn 系で報告されている。非輻射再結合中心がある結晶で η を増加させるには、1S 励起子の減衰寿命の輻射成分 $[\tau_{\text{rad}}(1)]$ の減少が効果的である。そこで、 $\tau_{\text{rad}}(1)$ の温度依存性とその決定機構を明らかにする必要がある。実験では、一部の温度範囲において $\tau_{\text{rad}}(1)$ が $T^{3/2}$ に比例することが報告されているが、3/2 より大きなべき数や小さなべき数も報告されており、様々な温度依存性が得られている[1,2]。理論的には、励起子が 1S 状態のみに局在し、運動量空間で熱平衡分布をすると仮定すれば、 $\tau_{\text{rad}}(1)$ が $T^{3/2}$ に比例するということが報告されている[3]。一方で、1S 状態以外にもポピュレーションが分布している実験事実を踏まえ、 $n \geq 2$ の励起子と自由キャリア状態、およびフォノンの相互作用を考慮したフォノン・励起子・輻射(PXR)モデルを構築して計算を行った結果、 $\tau_{\text{rad}}(1)$ の T のべき数が 3/2 よりも大きくなることがわかった[4]。本研究では、様々な準位にポピュレーションが分布する中で、 $\tau_{\text{rad}}(1)$ が $T^{3/2}$ に比例するか、その他のべき数を示すような様々な温度依存性を決めるメカニズムを説明する。GaIn を対象に PXR モデルで理論解析を行う。

電子と正孔のキャリア密度がアンバランスになる時、 $\tau_{\text{rad}}(1)$ はより多い方のキャリア密度で決まることが分かった [Fig. 1(a)]。キャリア密度のバランスが変化する原因としては、キャリアトラップ、拡散、残留電子などが考えられる。自由キャリアとドナー間の遷移過程を取り入れて残留電子の効果を調べると Fig. 1(a)と同様となり、実験と同様にドーピング密度 N_D の増加によってべき数が減少した。また、エネルギー準位のブロードニングの効果を取り入れ、3/2 を含む様々なべき数の $\tau_{\text{rad}}(1)$ の温度依存性を得ることができた [Fig. 1(b)]。図の n_{max} は励起子の最大の主量子数である。 $\tau_{\text{rad}}(1)$ の温度依存性の決定要因は従来考えられていた励起子の運動量分布によるものではなく、残留電子とエネルギー準位のブロードニングによるものである可能性がある。

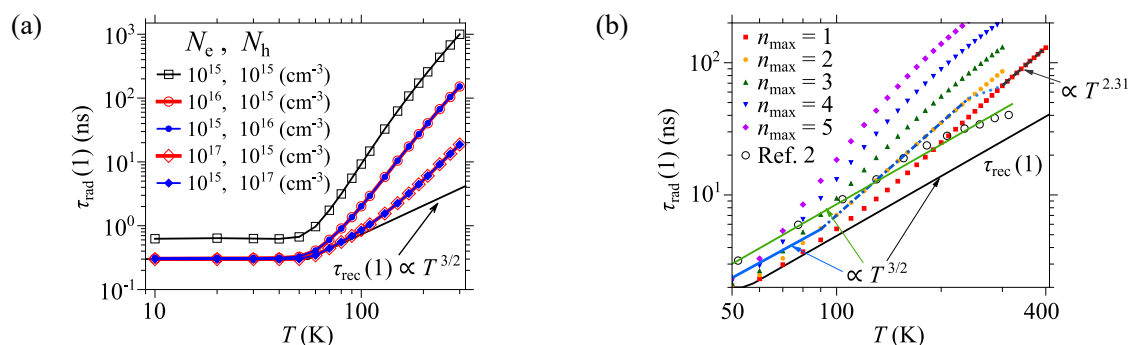


Fig. 1. Temperature (T) dependence of lifetime of 1S exciton. $\tau_{\text{rec}}(1)$ is the inverse of the recombination probability. Symbols except for “o” in (b) denote $\tau_{\text{rad}}(1)$ obtained from PXR model, and “o”s denote the experimental results in Ref. [2]. (a) Unbalance densities of electron (N_e) and hole (N_h) at excitation for $n_{\text{max}} = 1$ and $N_D = 0$. (b) $n_{\text{max}} = 1, 2, 3, 4$, and 5, for excitation density of 10^{15} cm^{-3} and $N_D = 1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. The blue solid line, dashed-dotted line, and dotted line show the dependence when taking into account the gradual broadening with the increase in temperature.

参考文献

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