

発光量子効率におけるフォトンリサイクル効果の理論解析

Theoretical analysis of photon-recycling effect on external quantum efficiency of radiation

産総研¹, 東北大多元研² ○浅井栄大¹, 小島一信², 秩父重英², 福田浩一¹

AIST¹, IMRAM-Tohoku Univ.² ○H. Asai¹, K. Kojima², S. F. Chichibu², and K. Fukuda¹

E-mail: hd-asai@aist.go.jp

フォトルミネッセンス (PL) スペクトルは材料のバンド構造や結晶品質を反映するため、その測定は材料物性を調べる強力な手段の一つになっている[1-4]。近年、我々は全方位PL (ODPL) 測定を用いて半導体単結晶のPL強度絶対計測に世界で初めて成功し、材料固有の発光量子効率をPL強度から精密に議論することを可能にした[5-6]。しかし、PL強度は励起キャリアの空間的ダイナミクスと密接に関わっているため、単純なレート方程式から外部量子効率 (EQE) を理解する事は難しい。そこで、我々はこれまで「キャリアの空間分布」と「蛍光の自己吸収過程」を考慮したEQEの新しい理論的枠組みを提案し [7,8]、自己吸収過程に由来する光取り出し効率の低下がEQEに大きな影響を与える事を明らかにしてきた。しかし、我々の先行研究では主に非発光再結合が支配的な試料に着目して解析している。そのため、発光再結合が支配的な試料において重要となるフォトンリサイクル (試料内部における自己吸収と再発光) の効果が十分に議論されていない。

そこで、本研究では発光再結合が支配的な領域におけるEQEの数値計算を行い、フォトンリサイクルがEQEに与える影響を議論する。本研究ではn型半導体の弱励起条件を考え、少数キャリア (ホール) の分布はドリフト拡散モデルに基づく以下の電流連続式から求めた。

$$D_h \frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} = -G_0 e^{-\alpha x} + N_t C_h p(x) + B N_0 p(x) - G_{\text{self}}(x)$$

ここで、 D_h はホールの拡散係数、 G_0 は励起光によるキャリア生成レート、 N_t は非発光再結合中心濃度、 C_h はホールの捕獲係数、 B は自然放出係数、 N_0 は平衡状態における電子濃度、 G_{self} は自己吸収によるキャリア生成を表す。EQEはキャリア分布に基づいて計算したPL強度と光励起強度との比から求めた[8]。また、フォトンリサイクルの効果を明らかにするために、上式において自己吸収項 G_{self} を無視した場合に関しても同様にEQEの計算を行った。右図にn-GaNの物性パラメータを用いて計算したEQEの B 依存性を示す。フォトンリサイクルが起こらない場合には(w/o recycling)、発光再結合レートが大きくなるにつれてEQEの値が光取り出し効率の値へ収束していく様子が見てとれる。一方、フォトンリサイクルが起こると(w/ recycling)、EQEは大きく増大し、その値は1に近づいていく。このEQEの計算値は先行研究で求めたEQEの解析解[8]に良く一致している。また、この図から B が非常に大きい領域ではフォトンリサイクルが起こる場合においてもEQEの増大が抑えられている事がわかる。これは強いフォトンリサイクルにより試料内部へのキャリアの拡散が促進され、自己吸収の効果が増大する事に由来する。

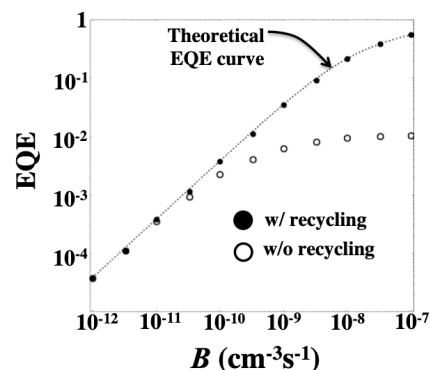


Figure: Calculated EQE as a function of B w/ recycling (filled circle) and w/o recycling (open circle). The dotted line indicates the theoretical EQE curve.

- [1] M. Tajima, Appl. Phys. Lett. **32**, 719 (1978). [2] Q. Dai *et al.*, Appl. Phys. Lett. **94**, 111109 (2009).
 [3] Chichibu, *et al.*, Adv. Mater. **29**, 1603644 (2017). [4] Chichibu, *et al.*, JAP **123**, 161413 (2018).
 [5] Kojima, Chichibu, *et al.*, JAP **120**, 015704 (2016). [6] Kojima, Chichibu, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **111**, 032111 (2017).
 [7] 浅井栄大, 小島一信, 福田浩一, 秩父重英, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 11a-W541-8 (2019).
 [8] Asai, Kojima, Chichibu, and Fukuda, Phys. Rev. Applied (accepted)