自己吸収過程を考慮した発光量子効率の解析式

Analytical solution for quantum efficiency of radiation considering self-absorption process

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]

AIST[1], IMRAM-Tohoku Univ.[2] ○H. Asai[1], K. Kojima[2], S. F. Chichibu[2], and K. Fukuda[1]

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

PL (Photoluminescence)は、材料のバンド構造のみならず結晶品質を反映した発光スペクトルを示す事から、光物性評価から点欠陥濃度の定量まで幅広く活用されている[1-4]。近年、我々は全方位PL（ODPL）測定を用いた半導体結晶の絶対外部量子効率 (EQE) の計測に成功し、そこから内部量子効率 (IQE) の評価を行った[5-6]。IQEは非発光再結合中心濃度（N_T）の単純な解析関数として表されるため、IQEから非接触でN_Tを検量する事が可能となる。そのため、ODPL測定による発光量子効率の評価は半導体自立結晶の新しい品質評価技術として注目を集めている。しかし一方で、EQEの理論的な解釈に未だ不十分な点があるため、IQEの評価法については議論の余地が残っている。PL測定では励起光の照射表面にキャリアが励起され、そのキャリアが種々の再結合現象を起こしながら試料内部に拡散する。そして、キャリアの発光再結合による光は試料内部における自己吸収を経て外部に取り出され、PL強度として検出される。そのため、EQEを評価するためには試料内部の不均一なキャリア分布と、その分布に依存した「自己吸収過程」による光の減衰を考慮する事が不可欠となる。

そこで、本研究ではドリフト拡散モデルに基づき自己吸収過程を考慮したEQEの理論式を構築した。まず、非発光再結合中心による再結合 (R_{NRC})、発光再結合 (R_{rad})、励起光によるキャリア生成 (G_{pump})、自己吸収によるキャリア生成 (G_{self})、表面再結合 (R_{self})、を考慮した以下の少数キャリアの電流連続式から出発し、EQEの形式的な式を求めた。

$$\frac{1}{q}\frac{\partial J_{\mathrm{h}}(x)}{\partial x} = -R_{\mathrm{NRC}}(x) - R_{\mathrm{rad}}(x) + G_{\mathrm{pump}}(x) + G_{\mathrm{self}}(x), \quad \frac{1}{q}J_{\mathrm{h}}(0) = R_{\mathrm{surf}},$$

J_h は少数キャリア電流、qは電荷素量、v_s は表面再結合速度を示している。更に本研究では、弱励起強度の条件で導出される少数キャリア濃度分布の解析式[7]からEQEの解析式を得た。この式はIQEと同様に N_T の単純な関数となっており、EQEを用いた N_T の検量を可能とする。右図に、n-GaNの物性パラメータを用いて計算したIQEとEQEのN_T依存性の例を示す。EQE はIQEと異なり、光取り出し効率の影響を受けて減少する。我々はこの取り出し効率が、光学反射過程に由来する効率 η_{opt} と自己吸収過程に由来する効率 η_{self} の両者の寄与からなる事を見出した。η_{self}はキャリア分布に強く依存するため、EQEはキャリアの拡散に大きな影響を受ける。講演では導出した理論式を基にIQEとEQEの物理的解釈の違いについても詳細に説明する。

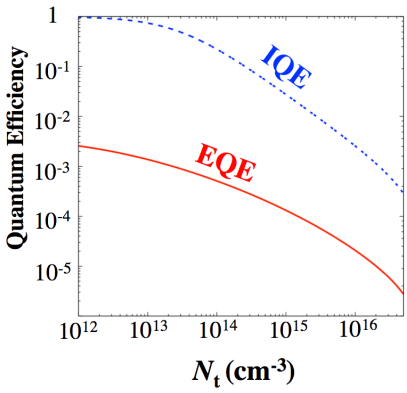

Figure: EQE (solid line) and IQE (dotted line) as a function of N_T.

[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 65 回応用物理学会春季学術講演会 20a-E202-1 (2018).

© 2019年 応用物理学会