

フォノン輸送のミクロ評価と発光効率への影響

Electron-phonon interaction and microscopic phonon transport analysis

千葉大院工 ○石谷 善博

Chiba Univ., Yoshihiro Ishitani

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

半導体デバイスの多くは電子-フォノン相互作用により動作特性が左右されるため、この相互作用制御が試みられている。熱電素子では熱伝導の低下が望まれる一方でトランジスタや発光デバイスでは非熱平衡フォノン排除が求められる。現在の排熱は外部素子の取付けや基板材料の選択などであり、電子-フォノン相互作用特性に合わせてデバイス内部からフォノン排除を図るものではない。また、フォノンと光の相互作用幅は室温でも 1 meV 以下であり、電子系と対比される。デバイス活性層の冷却を図るためには、フォノン過程、電子フォノン相互作用、結晶中のフォノン輸送過程についての知見が必要である。本講演では発光デバイスやトランジスタの特性向上に必要な制御対象となるフォノンモードやフォノン輸送に関わるラマン分光解析について紹介する。

我々は電子・正孔衝突、音響フォノン、光学フォノンと励起子の相互作用を取り入れた励起子状態分布と発光効率に関する理論計算(PXR-model)を行い観測結果との相関について報告した。一般に室温程度の温度におけるフォノンの状態占有度は音響フォノンが光学フォノンを圧倒し、熱伝導は音響フォノンに支配される。しかし、AlN や GaN, ZnO における主な発光種である励起子 1S 状態の励起による脱ポピュレーション過程は 150 K 程度以上で縦光学(LO)フォノンにより支配されることが分かった。これは、非熱平衡 LO フォノン排除が最も重要であることを示す。フォノン過程と電子衝突過程のバランスにより励起子の連続準位と離散準位のポピュレーション分布やその輸送フラックスは大きく変化し、これが輻射再結合速度に影響する。このため、残中電子密度は輻射性結合速度の温度依存性に大きな影響を与えると考えられる。これは単にキャリア数が増えるという効果とは異なる。

フォノン輸送制御は超格子利用などによる手法が考えられるが、窒化物半導体では結晶欠陥による熱輸送への影響を明確にする必要がある。熱伝導度の転位密度依存性は主に理論計算により考察されているが、欠陥における熱伝導のイメージング例は少ない。ラマン散乱はフォノンモードを区別した輸送特性を評価できる可能性があり、本講演では、熱生成とラマン信号観測の 2 種レーザを同時照射する手法を用いるなどして解析した GaN 上の InGaN 層の層内の熱輸送と界面方向の熱輸送特性の違い、特に格子不整転位における熱輸送抑制の観測結果を述べる。また、先に述べたように LO フォノンの輸送過程の詳細を解明することは必要であり、本研究における計測にみられる LO フォノンとその他のモードの違いについても言及する。

本研究は科研費 16H06425, 17H02772 により行われた。