InAs/GaAs 量子ドット超格子におけるホットキャリア冷却過程

Hot-carrier cooling process in InAs/GaAs quantum dot superlattices

○ 原田 幸弘，笠松 直史，渡部 大樹，喜多 隆 (神戸大院工)
○Y. Harada, N. Kasamatsu, D. Watanabe, and T. Kita (Kobe Univ.)
E-mail: y.harada@eedept.kobe-u.ac.jp

【はじめに】ホットキャリア型太陽電池は、バンド内緩和時間の長い光吸収材料におけるホットキャリアをエネルギー選択電極によって取り出す太陽電池であり、太陽光標準スペクトル（AM1.5、非集光）照射下において 66%の理論変換効率を有する [1]。我々は、1 次元的な状態密度を有する InAs/GaAs 量子ドット超格子（QDSL）に着目し、ホスト半導体 GaAs をエネルギー選択バリアとして量子準位に励起されたホットキャリアを取り出す方法を提案した [2]。本研究では、時間分解フォトルミネッセンス（PL）スペクトルから InAs/GaAs QDSL におけるホットキャリア冷却過程を解明することを目的とした。

【実験方法】試料作製には分子線エピタキシー法を用いて、InAs/GaAs QDSL を作製した。GaAs (001) 基板上に GaAs バッファ層を成長した後、2.0 分子層（ML）の InAs QD 層と 5.2 nm の GaAs 中間層を交互に 9 層成長し、GaAs キャップ層を 100 nm 成長した。また参照試料として、1.4 ML の InAs 量子井戸層と 10 nm の GaAs 中間層を交互に 10 層成長した、InAs/GaAs 多重量子井戸（MQW）を作製した。励起光源には Ti:sapphire レーザ（パルス幅：140 fs、繰り返し周波数：80 MHz）を用い、1.55 eV（QDSL）と 1.65 eV（MQW）の励起エネルギーにおいて 3 K で時間分解 PL 測定を行った。PL 信号は近赤外ストリークカメラ（QDSL）と可視ストリークカメラ（MQW）によって検出した。QDSL におけるキャリア温度は、PL スペクトルの不均一広がりと均一広がり、状態密度、キャリア温度を考慮して、PL スペクトルをフィッティングすることによって見積もった [2]。

【結果と考察】図 1(a) と 1(b) に、InAs/GaAs QDSL と MQW におけるキャリア温度の時間依存性を示す。励起光子密度の増加に伴ってキャリア温度は単調に増加し、InAs/GaAs QDSL では励起光子密度 1.1×10^{14} photon/cm^2 において 1000 K 以上のキャリア温度を観測した。InAs/GaAs MQW では QDSL よりも約 1 桁低いキャリア温度しか得られなかったことから、InAs/GaAs QDSL における高いキャリア温度の実現は 1 次元的な状態密度に起因すると考えられる。また図 1 中の破線は、InAs におけるキャリアのエネルギー散逸率の温度特性を用いて、キャリア温度の初期値と現象論的なエネルギー散逸率の減少因子をフィッティングパラメータとした計算結果である。図 2 に、図 1 破線から得られるエネルギー散逸率の減少因子の励起光子密度依存性を示す。ここで、小さい減少因子が長いホットキャリア冷却時間に対応することに注意する。白抜きのシンボルは、GaAs 活性層のバンドギャップエネルギーより 0.12 eV 高エネルギーで励起した結果 [3] である。GaAs バリア層を励起した InAs/GaAs MQW における減少因子は、$Al_{0.34}Ga_{0.66}As$ バリア層を励起しない GaAs/$Al_{0.34}Ga_{0.66}As$ MQW と同様の励起光子密度依存性を示した。この結果は、バリア層を励起した時間分解 PL スペクトルからホットキャリア冷却過程が評価可能であることを示唆している。また、InAs/GaAs QDSL では、すべての励起光子密度において減少因子が 0.0011～0.0020 という小さい値を示した。この結果は InAs/GaAs QDSL の 1 次元的な状態密度に起因する長いバンド内緩和時間を示唆しており、InAs/GaAs QDSL においてホットキャリアによる高効率な電流取り出しの実現が期待できる。

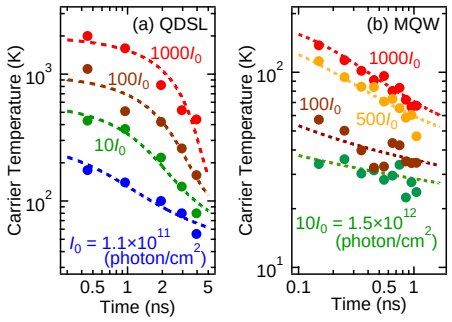

Fig. 1. Hot-carrier cooling dynamics in (a) InAs/GaAs QDSL and (b) InAs/GaAs MQW.

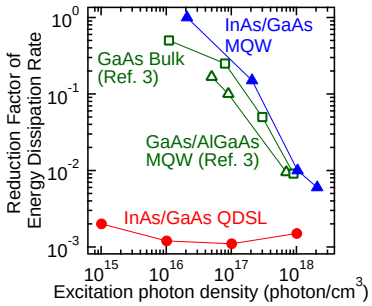

Fig. 2. Excitation photon density dependence of the reduction factor of the hot-carrier energy dissipation rate.

【参考文献】[1] R. T. Ross and A. J. Nozic, J. Appl. Phys. **53**, 3813 (1982). [2] D. Watanabe *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 171904 (2014). [3] K. Leo *et al.*, Phys. Rev. B **37**, 7121 (1988).

© 2015年 応用物理学会