

Si 直接ドーピング InAs/GaAs 量子ドットのキャリア緩和過程

Carrier relaxation process in Si-direct doped InAs/GaAs quantum dots

神戸大院工, °長谷川 隆一, 原田 幸弘, 喜多 隆

Kobe University, °R. Hasegawa, Y. Harada, and T. Kita

E-mail: r-hasegawa@stu.kobe-u.ac.jp

【はじめに】自己形成 InAs/GaAs 量子ドット(QD)はその3次元的な量子閉じ込めによってできるデルタ関数的な電子状態(励起子状態)によって、クーラーレス直接変調レーザー、偏波無依存超高速光中継デバイス、また最近では高変換効率中間バンド型太陽電池などを実現することが期待されている。この様な量子ドットを利用した光デバイスではドット中のキャリア数がデバイス特性に大きく影響し、精密なキャリア制御が不可欠である。われわれは量子ドットへの精密な不純物ドーピングを実現するため、InAs/GaAs 量子ドットの自己形成過程を巧みに利用した不純物の直接ドーピング技術を開発した[1]。直接ドーピングは InAs 自己形成過程で不純物を選択的に供給することで量子ドット中に効果的に不純物を取り込む技術である。これまでの研究で、Si を直接ドーピングした InAs 量子ドットにおいて、余剰電子による電子捕獲欠陥の補償効果を明らかにするとともに、発光特性の向上を確認した[2,3]。本研究では、量子ドットあたり1個をこえる Si を添加したときの光励起キャリアのエネルギー緩和過程を明らかにするため、時間分解フォトルミネッセンス(PL)測定法を用い詳細に評価した。

【実験と結果】MBEにより、アンドープ GaAs(001)基板に InAs QD を成長した。Si ドープした試料(Si-doped QDs)とドーピングしない試料(undoped QDs)を作製した。Si ドーピングは QD 成長中の Assembling step [1] で選択的に行い、Si 面密度は $4.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ (QD 1個当たり約3個)とした。InAs 供給量は 2.1 原子層である。測定は、励起光源にはパルス幅 130 fs、繰り返し周波数 80 MHz の Ti:sapphire パルスレーザー、検出には時間分解能 16 ps の近赤外ストリークカメラを用い、励起光エネルギー 1.55 eV、励起光強度 0.05 mW とした。まず、3~290 K における PL 測定より得た半値幅を図1(a)に、Si-doped QDs と undoped QDs の PL ピークエネルギーの差を図1(b)に示す。undoped QDs においては130 K 以上で半値幅が減少している。これは熱エネルギーにより QD 間でよりエネルギーの低い状態へのキャリア移動が生じ、大きな

QD にキャリアが集中した事を示唆している。対して Si-doped QDs では顕著な半値幅の変化がない。また、温度上昇に伴い Si-doped QDs と undoped QDs の PL ピーク値の差が小さくなることから、Si をドーピングすると QD のフェルミ準位が上昇してパウリブロッキング効果が生じ、大きな QD へのキャリアの面内移動が抑制されたと考えられる。続いて、undoped QDs でキャリアが熱活性による面内移動を明瞭に示す200 K で時間分解 PL 測定を行った。図2の実線は PL スペクトルを示す。また黒点は単一指数関数のフィッティングにより求めた各検出エネルギーでの PL 寿命を示す。高エネルギー側の高速な励起準位からの発光を除いて、Si ドーピングにより相対的に PL 寿命の検出エネルギー依存性が小さくなっており、チャージした量子ドットによるキャリアの面内移動のブロッキング効果が現れている。 [1] T. Inoue et al., J. Appl. Phys. **108**, 063524 (2010). [2] T. Kita et al., J. Appl. Phys. **110**, 103511 (2011).[3] R. Hasegawa, et al., PVSEC (2011) and MBE conference (2012).

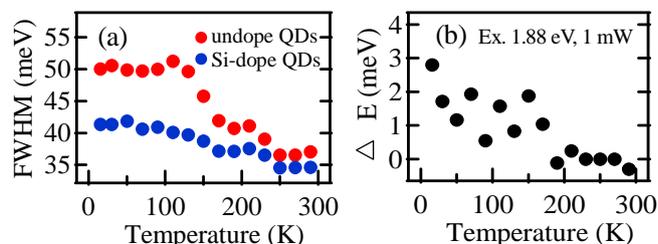


図 1. PL 測定結果. (a) FWHM, (b) PL ピークエネルギー差 (Si-doped QDs - undoped QDs)

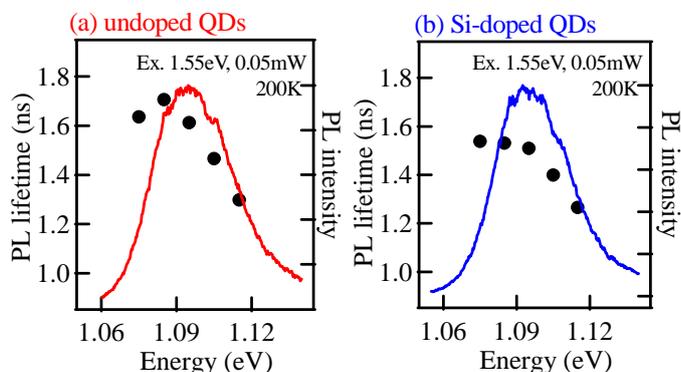


図 2. (a) undoped QDs, (b) Si-doped QDs の時間分解 PL 測定結果. (黒点 : PL 寿命, 実線 : PL スペクトル)