29a-G4-1

量子ドット太陽電池の輻射再結合特性

Radiative recombination characteristics in quantum dot solar cells

神戸大学，°笠松直史，長谷川愛子，喜多隆
Kobe Univ., °Naofumi Kasamatsu, Aiko Hasegawa, and Takashi Kita
E-mail:0934319t@stu.kobe-u.ac.jp

【はじめに】自己形成 InAs/GaAs 量子ドット(QD)は 3 次元的に閉じ込められたデルタ関数的な量子準位を有しており、レーザー、超高速光中継デバイス、最近では太陽電池への応用も非常に注目されている。特に、量子ドット量子準位を利用した中間バンド型の太陽電池では 3 次元量子閉じ込めの特性を積極的に利用することで、理想的な単一中間バンド太陽電池構造では、非集光で最大 48%、最大集光で 68%と、極めて高いエネルギー変換効率の実現が期待されている[1]。量子ドット太陽電池では pin 構造の i 層に QD を挿入するため、i 層で生じた電子を効率よく取り出して電流として活用できるが、その反面、強い内部電界は QD 間の波動関数の重なりに由来する電子的結合に影響する。特に、QD を高密度に積層して成長した場合の積層方向へのバンド形成に影響する。本研究では、内部電界が QD のバンド構造へ与える影響を、フォトルミネッセンス(PL)の発光減衰特性により調べた。【実験と結果】固体原料の分子線エピタキシーによって n 型 GaAs(001)基板上に、Si ドープ n 型 GaAs のバッファ層を成長し、次に InAs を 2.0 ML 供給して QD を自己形成させた。スペーサー層として GaAs を 18 ML 成長し、再び InAs を供給した。これを繰り返し、9 層の積層 QD を形成した。その後 Be ドープ GaAs の p 層と、窓層、コンタクト層を成長した。i 層が厚く(300 nm)電界が弱い(F=5×10^4 V/m)試料 1 と i 層が薄く(70 nm)電界が強い(F=2×10^5 V/m)試料 2、9 層積層 QD と cap 層の GaAs のみで電界のない(F=0 V/m)試料 3 の 3 つを作製した。励起レーザー波長 800 nm、励起光強度 1 mW、周波数 80 MHz のパルス光を照射し、3 K において、近赤外ストリークカメラを用いて時間分解 PL の測定を行った。図 1 に試料 1~3 の PL の発光減衰特性を示す。内部電界の大きさによって発光減衰時間が明らかに変化している。内部電界が大きな試料 2 の発光減衰時定数は内部電界が小さい試料 1 に比べて劇的に小さくなっている。一方、内部電界の小さな試料 1 では発光減衰時間が検出エネルギーに大きく依存した。内部電界が小さい場合、薄い GaAs 中間層を介して積層方向に QD が電子的に結合しており、波動関数が顕著に非局在化している。このため再結合寿命が長くなるとともに、非局在化によるキャリア移動によって発光寿命の検出エネルギー依存性が顕著に現れた。次に、弱い内部電界（5×10^4 V/m）の試料 1 と pin 構造を持たない無電界の試料 3 について時間分解 PL の温度特性を調べた。励起光強度は 100 μW である。図 2 に無輻射遷移過程が顕著に現われるまでの発光減衰時間の温度特性を示す。無電界の試料 3 では、励起子の並進運動によって約 30 K から発光減衰時間が大幅に増加しているのに対して、内部電界が存在する場合、発光減衰時間は温度にほとんど依存しないことが明らかになった。励起子再結合発光は、励起子が 1 次元的に並進運動するとき発光減衰時間 τ が温度 T の平方根に比例する；$\tau \propto T^{0.5}$。一方、2 次元的な場合は$\tau \propto T$となる[2]。試料 1 では$\tau \propto T^{0.21}$となり、電界による励起子のイオン化（キャリア分離）のため、励起子は明らかに局在しており、顕著な並進運動をしていないことがわかる。しかし、無電界の試料 3 は$\tau \propto T^{0.93}$に依存しており、励起子の 2 次元（面内）並進運動が支配的であることがわかった。これらの結果は、太陽電池の内部電界程度で量子ドット内の電子状態が局在化していることを示している。

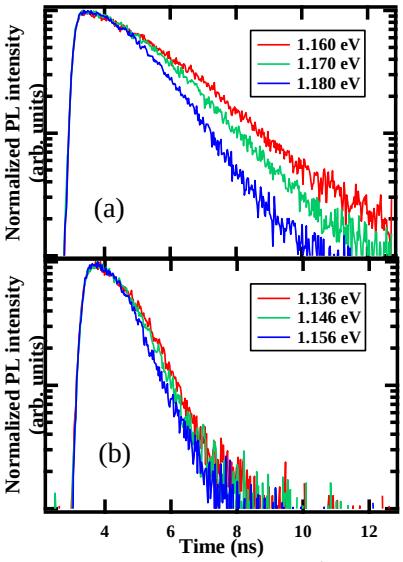

図 1 発光減衰特性(a)5×10^4 V/m [試料 1](b)2×10^5 V/m [試料 2]

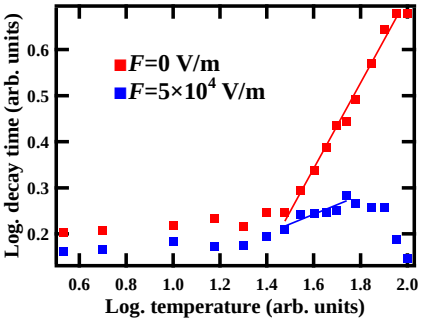

図 2 発光減衰時間の温度特性

[1]喜多隆「太陽電池のエネルギー変換効率」コロナ社(2012)、[2]H.Akiyama, S. Koshiba, T. Someya, K. Wada, H. Noge, Y. Nakamura, T. Inoshita, A. Shimizu, and H. Sakaki, Phys. Rev. Lett. **72**, 924 (1994).

© 2013 年　応用物理学会