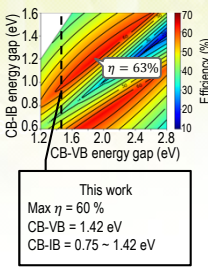


type-II 中間バンド型太陽電池に向けた GaAsSb/GaAs量子ドットの組成変調

樗木 悠亮¹、庄司 靖²、宮下直也¹、岡田 至崇¹
¹東京大学

²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム

研究の目的



中間バンド型量子ドット太陽電池
 理論変換効率 63% (最大集光時) [1]
 ☹️ 二段階光吸収によりバンドギャップ以下でも光励起
 ☹️ 中間バンドを介した再結合

GaAs_{1-x}Sb_x/GaAs量子ドット (QD)

- 長キャリア寿命のtype-II型バンド構造 [2]
- バンド構造をAs組成xで制御 [3]

中間バンド (IB) 位置
伝導帯 (CB) オフセット

実験

- GaAsSbの組成変調**
 - QDの組成測定は困難
→ GaAsSb薄膜を高分解XRDで測定
 - As fluxを変えてMBEで成膜
- GaAsSb/GaAs QD**
 - QDのバンド構造をnextnanoで計算 [4]
 - 薄膜と同じAsフラックスでQDを成長
→ QDのキャリア寿命をTRPLで測定

GaAsSb薄膜 成長条件

- 成長温度: 465°C
- 堆積量: 200 nm
- 成長速度: 0.10 ML/s
- Sb flux: 8×10^4 Pa
- As flux: $0, 1 \times 10^4, 6 \times 10^4, 1.2 \times 10^3$ Pa

サンプルの構造

- GaAsSb 200 nm
- GaAs buffer 200 nm
- Si-GaAs(001) substrate

QD 成長条件

- 成長温度: 465°C
- 堆積量: 2.3-6.0 ML
- 成長速度: 0.10 ML/s
- 成長中断: 1 min
- Sb flux: 8×10^4 Pa
- As flux: $0, 1 \times 10^4, 6 \times 10^4, 1 \times 10^3$ Pa

サンプルの構造

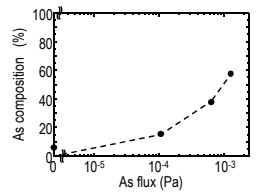
- GaAsSb QD
- Si-GaAs 150 nm
- GaAs buffer 200 nm
- 濡れ層 (WL)
- Si-GaAs(001) substrate

結果と考察

1. GaAsSbの組成変調

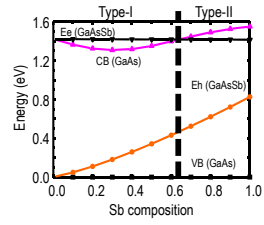
As組成を6~58%の範囲で制御

- As fluxが0 PaでAs組成が0.06
→ チャンバー内の残留Asが混入
or GaAs buffer層のAsとGaSbのSbが置換



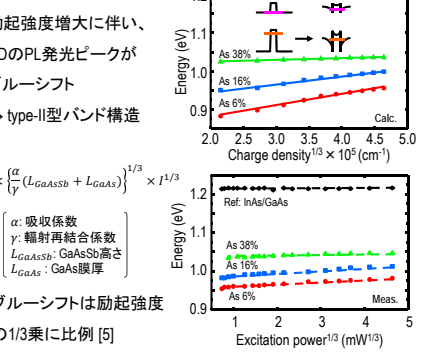
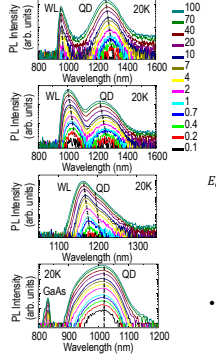
2. GaAsSb/GaAs QDの成長

- As組成増大 (Sb組成減少) によりバンド構造はtype-IIからtype-Iへ移行
- As組成増大により格子不整合が低減
→ QD密度が減少
- As組成58%ではQDが形成されず

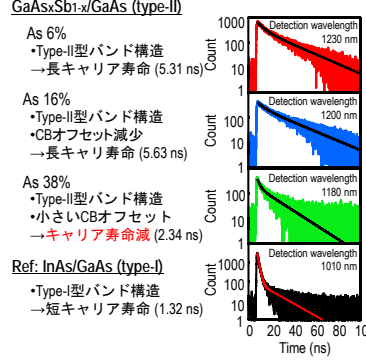


As flux	0 Pa	1×10^4 Pa	6×10^4 Pa	1×10^3 Pa
RSM GaAs(224)				
組成	As=6% (Sb=94%)	As=16% (Sb=84%)	As=38% (Sb=62%)	As=58% (Sb=42%)
バンド構造				
AFM $1 \times 1 \mu\text{m}^2$				
QD密度	$3.13 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$	$2.97 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$	$1.08 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$	No QDs

低温PLの励起強度依存性



低温時間分解PL



・励起波長 405 nm @5 K
 ・キャリア寿命の傾向は励起依存の傾きの値に比例
 → As組成38%のGaAsSb/GaAs QDは電子と正孔の空間的分離が弱い

QD	slope	Lifetime, τ_1	Lifetime, τ_2
As 6%	0.0064	5.31 ns	22.5 ns
As 16%	0.0076	5.63 ns	23.2 ns
As 38%	0.0034	2.34 ns	15.1 ns
InAs/GaAs	<0.0001	1.32 ns	13.5 ns

結論

- As組成6~58%のGaAsSb薄膜が得られ、量子ドットがAs組成38%まで形成された。
- シミュレーションにより、GaAsSb/GaAs量子ドットのバンド構造はAs組成が38%程度より増大するとtype-IIからtype-Iへ移行することが示された。
- キャリア寿命の長さはQDのPL発光ピークのブルーシフトの傾きに相関が見られた。
- As組成38%のQDはキャリア寿命が短く(2.34 ns)、電子と正孔の空間的分離が弱い可能性を示唆。

参考文献

- [1] A. Luque and A. Martí, Phys. Rev. Lett. **78**, 5014 (1997).
- [2] C.-C. Tseng et al., IEEE J. Quantum Electron. **47**, 335 (2011).
- [3] M. Kunruga, J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 225101 (2018).
- [4] <https://www.nextnano.de/nextnanoplus>
- [5] N. N. Ledentsov et al., Phys. Rev. B **52**, 14058 (1995).

謝辞

本研究はNEDO高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発(超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発)の委託の下で行われた。