

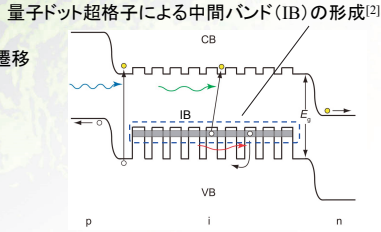
多重積層Ge/Si_{1-x}C_x量子ドットの作製と太陽電池応用

後藤和泰¹・大島隆治²・菅谷武芳²・坂田功²・松原浩司²・近藤道雄^{1,3}
¹東京工業大学 大学院総合理工学研究科 物質科学創造専攻
²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター
³産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所

研究の目的

中間バンド型量子ドット太陽電池応用へ向けた歪み補償系積層Ge/Si_{1-x}C_x量子ドットの作製

- 高エネルギーの光子 ($h\nu \geq E_g$) 価電子帯 (VB) と伝導帯 (CB) の光学遷移 (VB→CB)
- 低エネルギーの光子 ($h\nu < E_g$) 中間バンドを介した2段階の光学遷移 (VB→IB, IB→CB)



理論限界効率 $\leq 63\%$ (最大集光下)^[1]

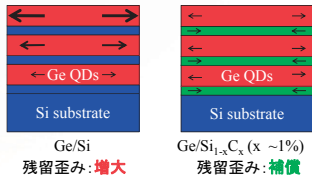
研究課題

- 多重積層化 量子ドットによる十分な光吸収
- pn接合方向への近接化 キャリア収集効率の向上

歪み補償系積層Ge/Si_{1-x}C_x量子ドットの開発

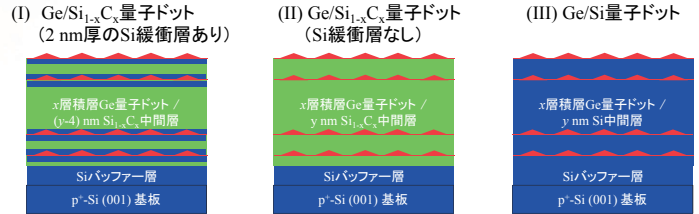
$$a_{\text{spacer}} = a_{\text{sub}} < a_{\text{QD}} \Rightarrow \text{歪みの蓄積}$$

$$a_{\text{spacer}} < a_{\text{sub}} < a_{\text{QD}} \Rightarrow \text{歪みの補償} \quad [3]$$

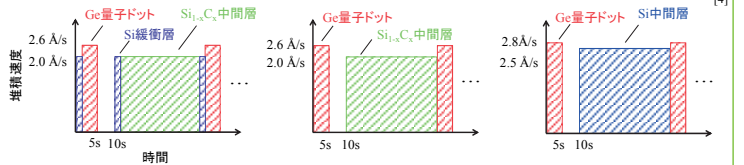


実験

固体ソース分子線エピタキシー (SS-MBE) 法で試料を作製



積層Ge自己形成量子ドットの成長シーケンス



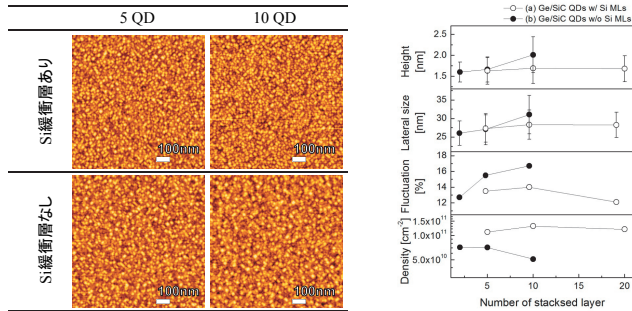
結果

Si_{1-x}C_x層上Ge量子ドットの作製

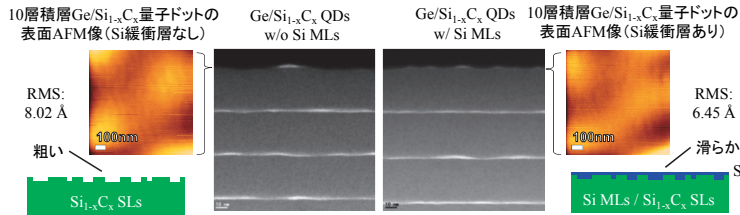
	(a) Ge/Si QDs	(b) Ge/Si _{1-x} C _x QDs	(c) Ge/Si _{1-x} C _x QDs
堆積速度 [Å/s]	2.8	2.8	2.6
高さ [nm]	1.8	2.5	1.5
サイズ [nm]	29.9	33.9	27.5
サイズばらざり [%]	11.1	14.1	9.7
密度 [cm ⁻²]	5.7 × 10 ¹⁰	1.1 × 10 ¹¹	1.3 × 10 ¹¹

- Si_{1-x}C_x層上のGe堆積は、Ge量子ドットの不均一性が増大
- 2.6 Å/sの堆積速度により、高均一かつ高密度なGe量子ドットがSi_{1-x}C_x層上に得られた
 ⇒ C-Ge結合は生じにくく、Ge原子は主にSi上で結晶化しやすくなるため、Ge原子のマイグレーションが抑制^[5]

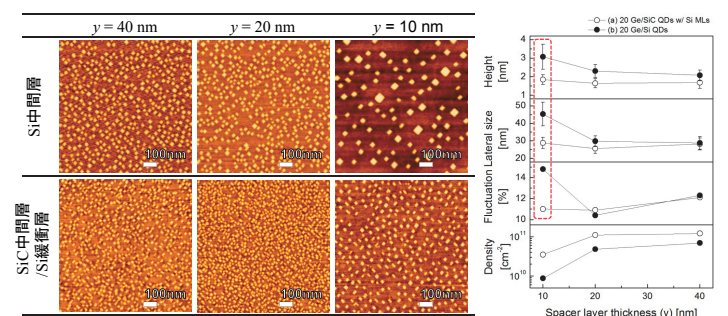
Si緩衝層を導入したGe量子ドットの作製



- Si緩衝層を導入しない場合、積層数の増大に伴いGe量子ドットサイズが増大
- Si緩衝層を導入することにより、積層方向に均一なGe量子ドットが形成
 ⇒ 表面粗さの改善、Ge-C結合の抑制

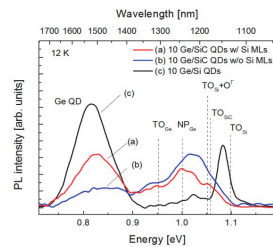


中間層膜厚依存性 (20層積層Ge量子ドット構造)



- Si中間層を用いたGe量子ドットは、y = 10 nmにおいて、局所歪みが蓄積することによりドットサイズが増大し、ドット密度が減少した^[6]
- Si_{1-x}C_x中間層を用いることにより、y = 10 nmを用いてもドットサイズの顕著な増大が抑制
 ⇒ 歪み補償効果

フォトルミネッセンス (PL): 40 nm中間層を用いた10層積層Ge量子ドット



- Ge/Si_{1-x}C_x量子ドットにおいて、Si緩衝層を導入することによりPL強度が約2.5倍に増大し、半幅幅が198.2 meVから96.7 meVへ減少
 ⇒ ヘテロ界面品質と量子ドット構造の改善
- Ge/Si_{1-x}C_x量子ドットのPLピークエネルギー (0.828 eV) は、Ge/Si量子ドット (0.818 eV) に比べて高エネルギー化
 ⇒ 局所歪み場の増大もしくは量子サイズ効果
- PLピークエネルギーは、Cの混入により1.08 eVから1.03 eVへ長波長化
 ⇒ C原子の混入で生じる引っ張り歪みによるΔバレーの減少^[7]

Si緩衝層の導入による量子ドット形成前の表面粗さの改善、CとGe原子の相互作用を抑制することにより、Ge量子ドット構造と光学特性が改善することを見出した

結論

- SS-MBE法を用いてSi基板上に積層Ge/Si_{1-x}C_x自己形成量子ドットを作製した。
- 堆積速度2.6 Å/sを用いることにより、Si_{1-x}C_x層上に高均一かつ高密度なGe量子ドットが得られた。
- Si_{1-x}C_x中間層を用いた積層量子ドット構造において、Si緩衝層を導入することにより、積層方向に均一なGe量子ドットが得られた。
- Si緩衝層を導入することにより、Ge/Si_{1-x}C_x量子ドットの光学特性が顕著に改善した。

参考文献

- [1] A. Luque *et al.*, Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 5014.
- [2] K. Yoshida *et al.*, J. Appl. Phys. **112** (2012) 084510.
- [3] D. Alonso-Álvarez *et al.*, Adv. Mater. **23** (2011) 5256.
- [4] K. Gotoh *et al.*, J. Cryst. Growth **378** (2013) 439.
- [5] O. Leifeld *et al.*, Mater. Sci. Eng. B **74** (2000) 222.
- [6] Vinh Le Thanh *et al.*, Phys. Rev. B **60** (1999) 5851.
- [7] K. Brunner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **76** (1996) 303.