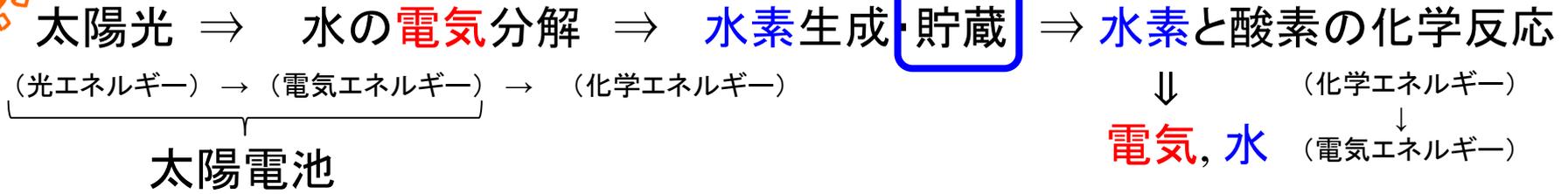


量子ドットデバイス と最先端太陽電池開発

電気通信大学 基盤理工学専攻 山口 浩一

<クリーンテック> 再生可能エネルギーを利用した安定な電力供給



量子ドットとは

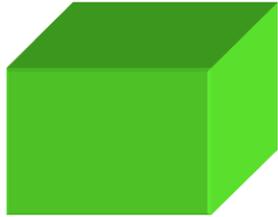
InAs

GaAs

4 nm

半導体量子ナノ構造の電子状態

バルク半導体
(3D 電子系)



(1D)量子井戸
(2D 電子系)



量子細線 (2D-QW)
(1D 電子系)

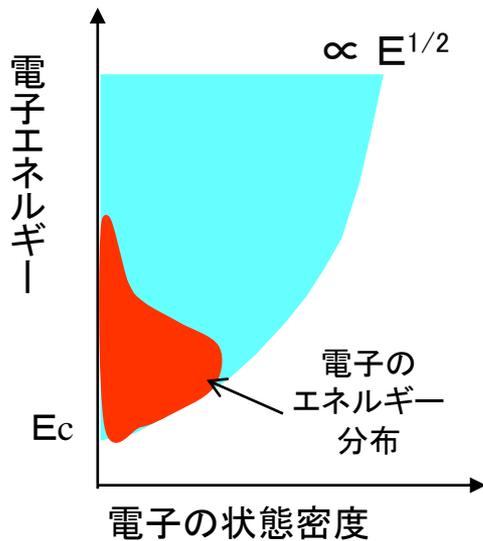


量子ドット (3D-QW)
(0D 電子系)

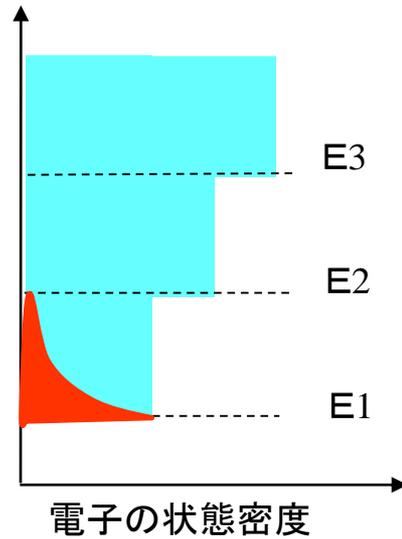


< 電子ド・ブレイ波長

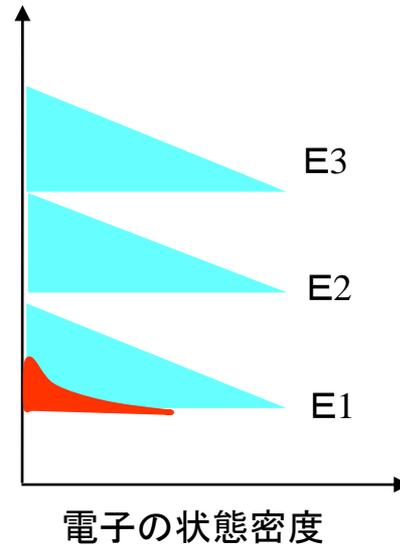
放物線関数状の状態密度



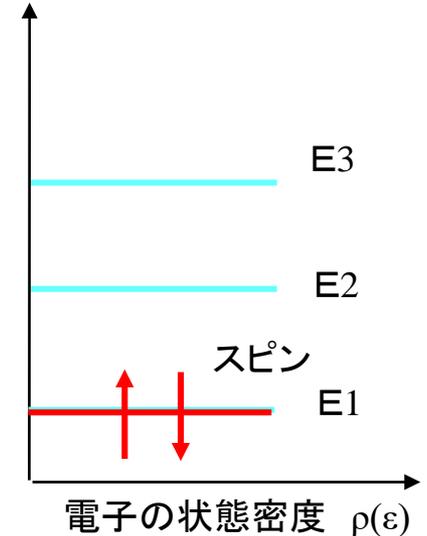
階段状の状態密度



鋸状の状態密度



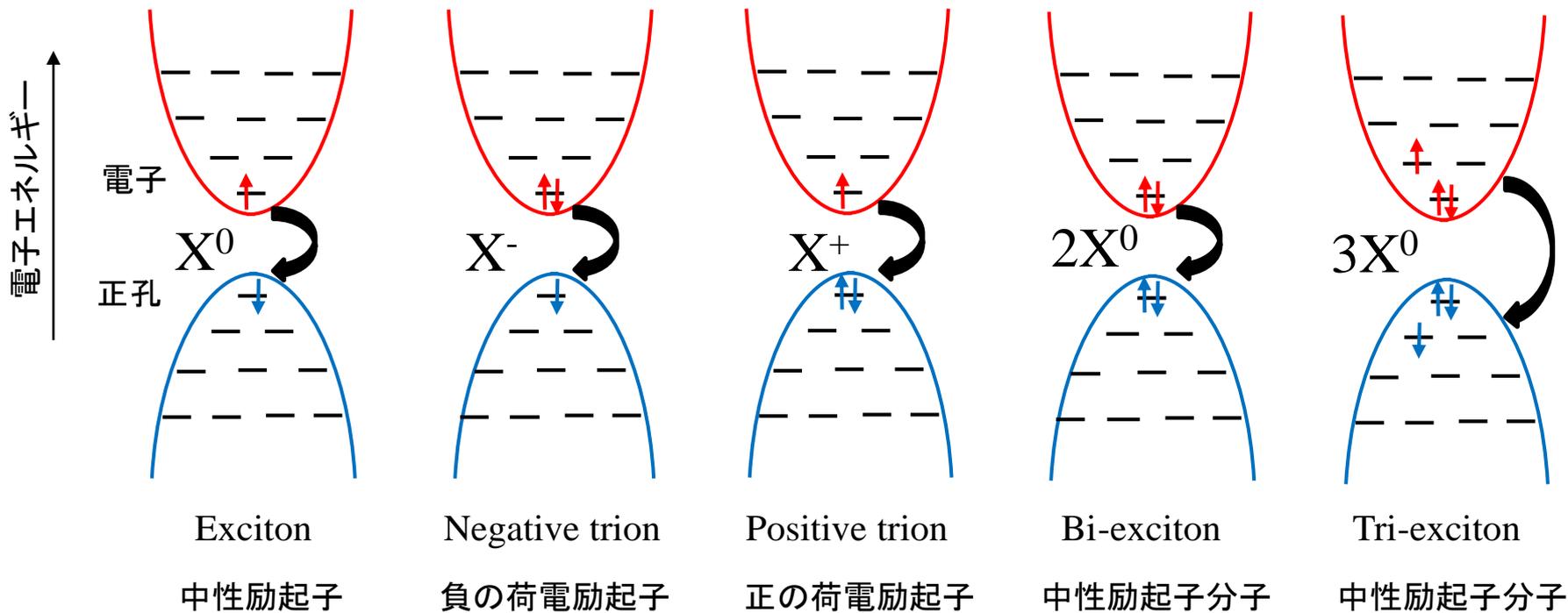
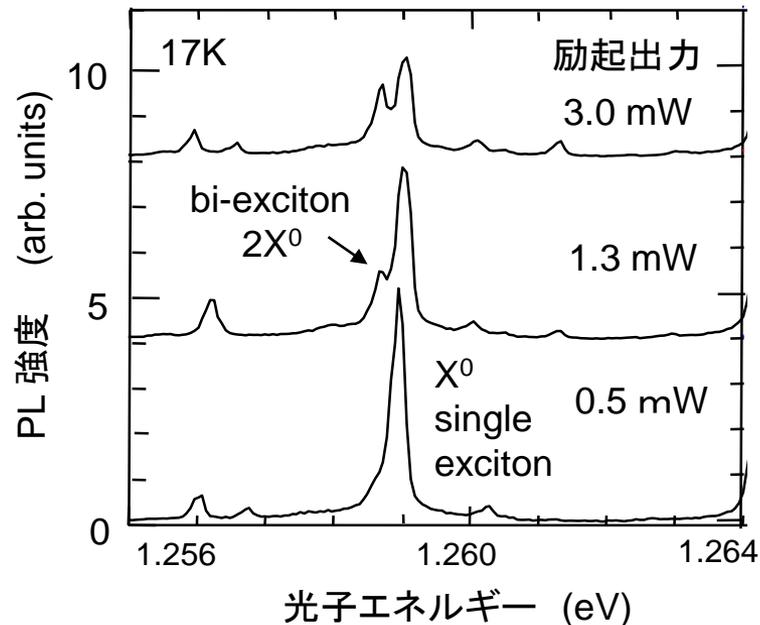
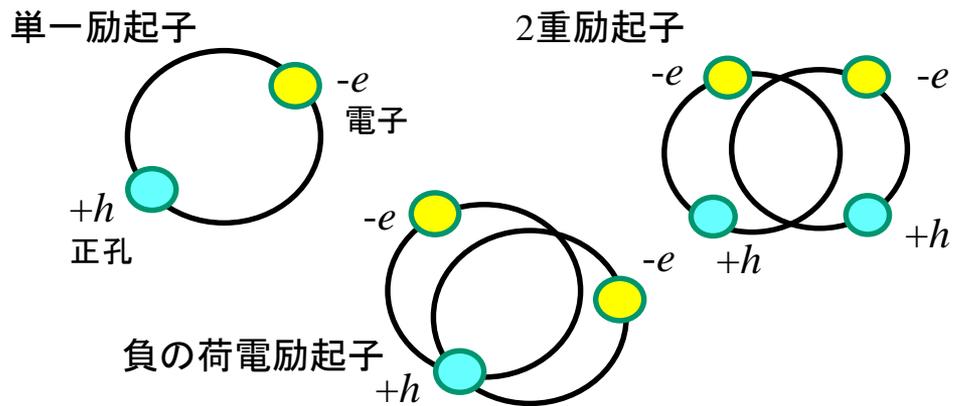
デルタ関数状の状態密度



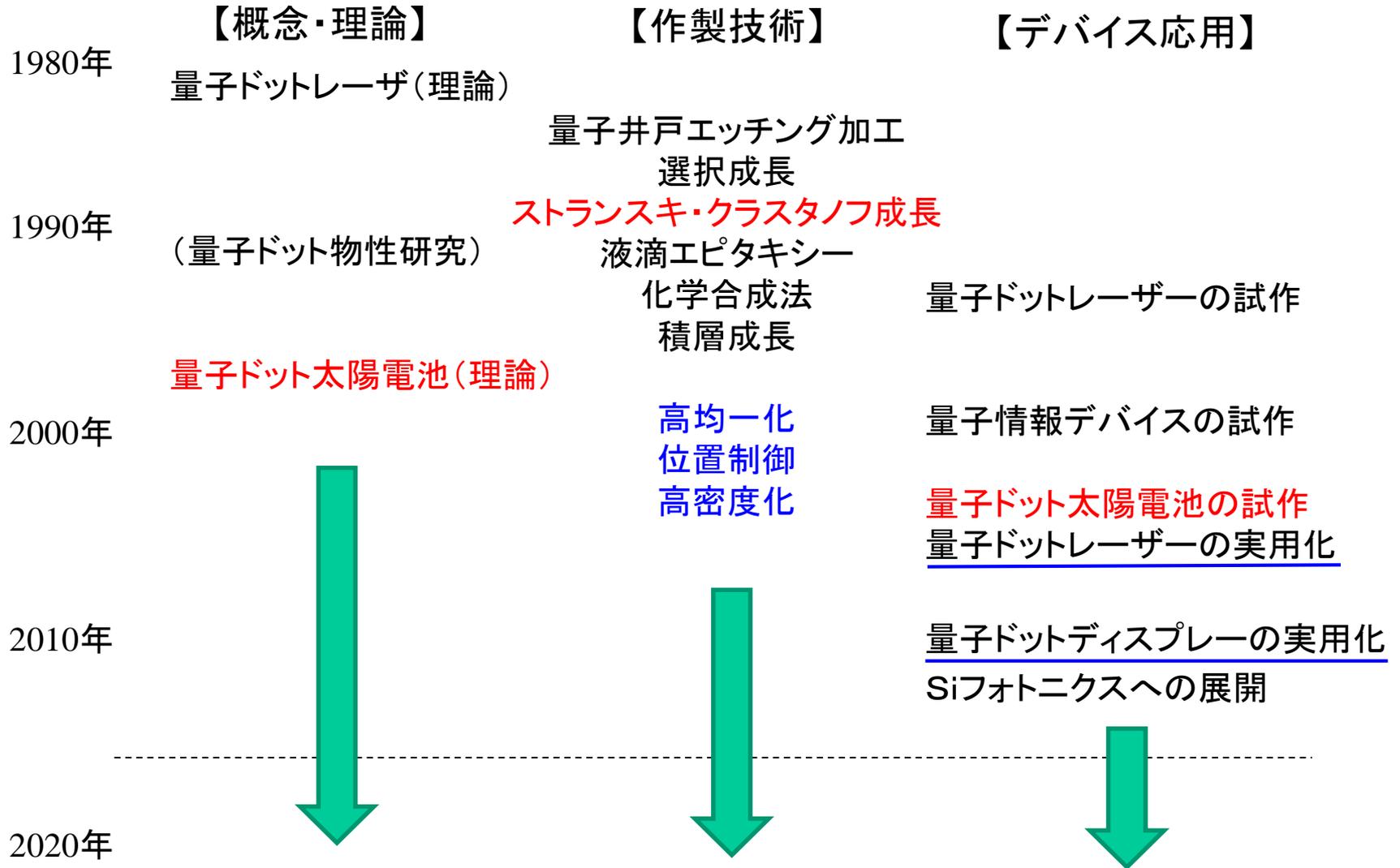
量子ドット内の電子は、完全に離散化した量子準位に存在 (人工原子とも呼ばれる)

$$\rho(\epsilon) = \sum_{n,l,k} \frac{1}{L_x L_y L_z} \delta[\epsilon - \epsilon_x(k) - \epsilon_y(l) - \epsilon_z(n)]$$

量子ドット内の励起子と遷移エネルギー

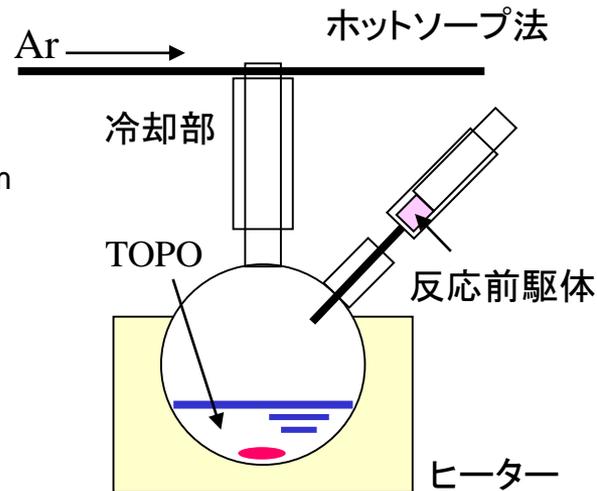
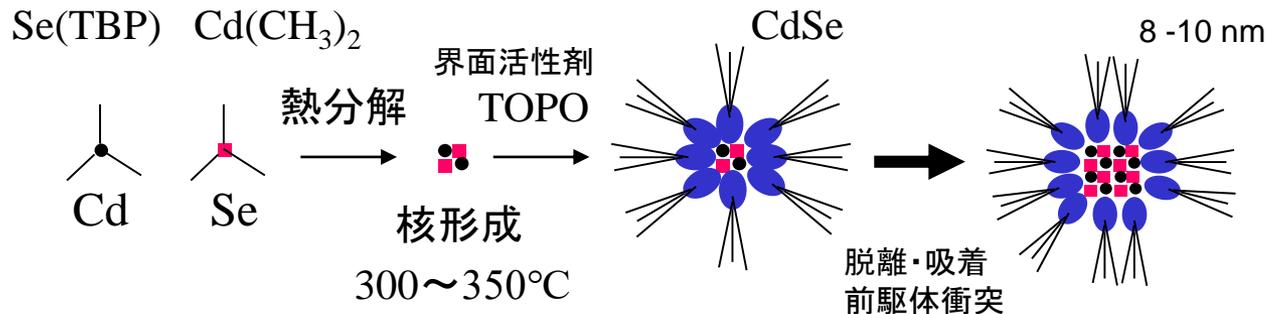


量子ドットの研究開発



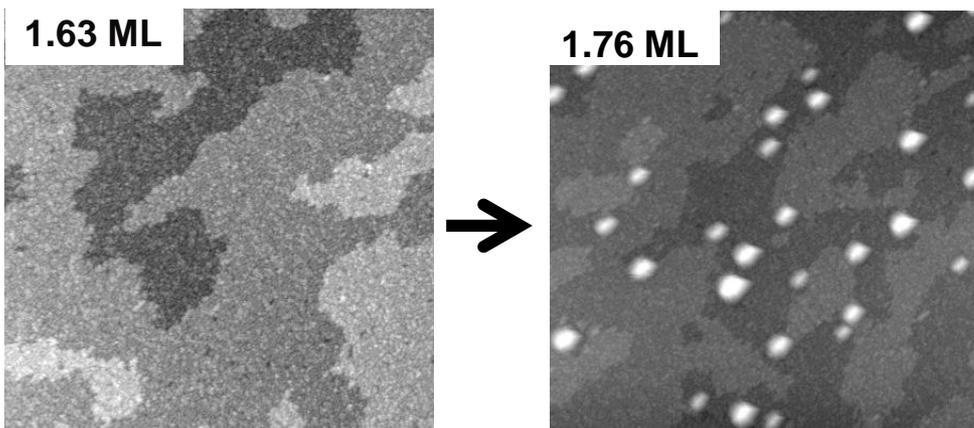
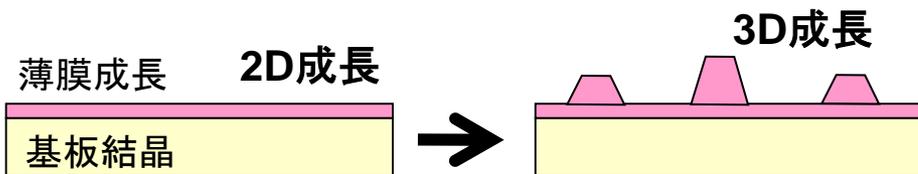
化学合成法

溶液中でのコロイダルドットの化学合成



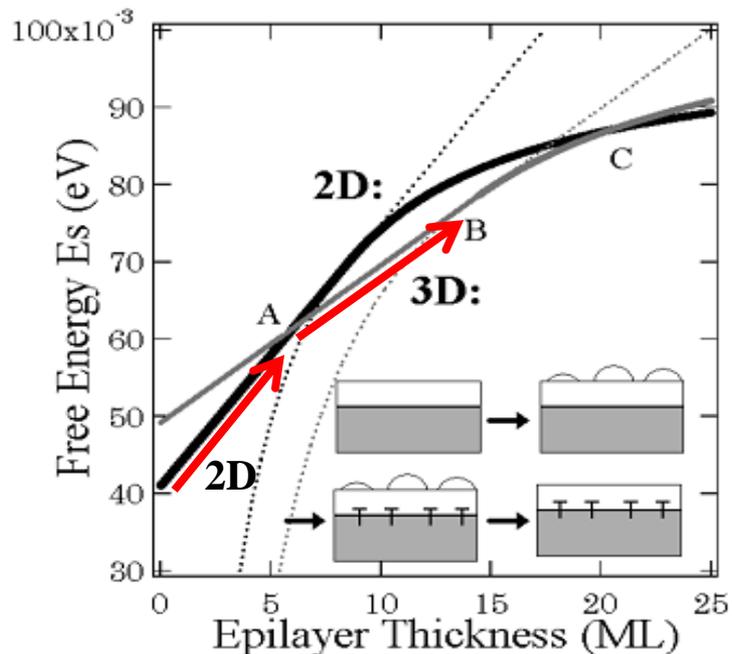
自己組織化法(自己形成法)

ストランスキー・クラスタノフ (SK) 成長モード

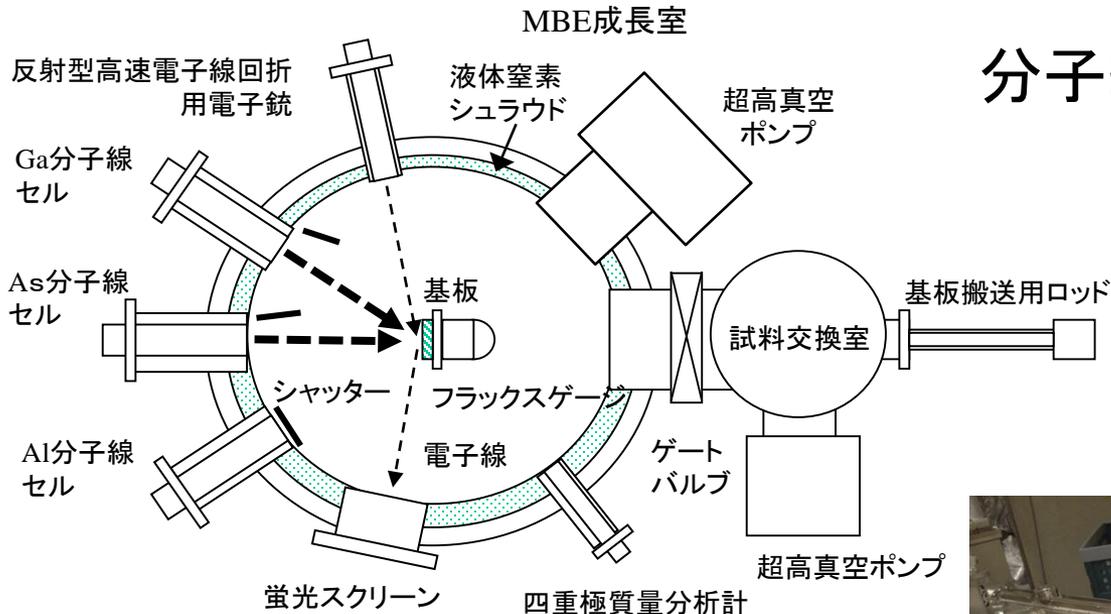


GaAs上へのInAs量子ドットのSK成長

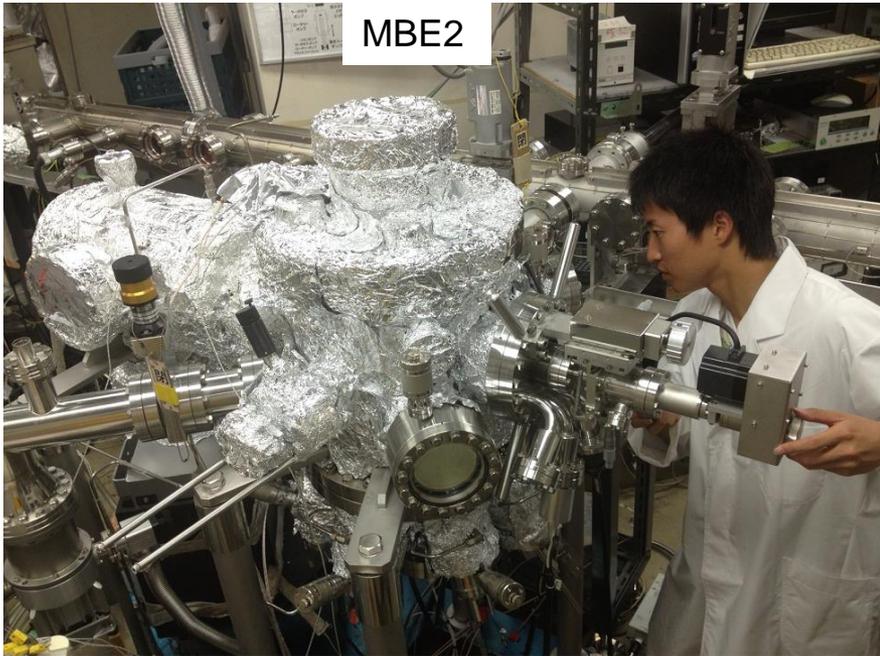
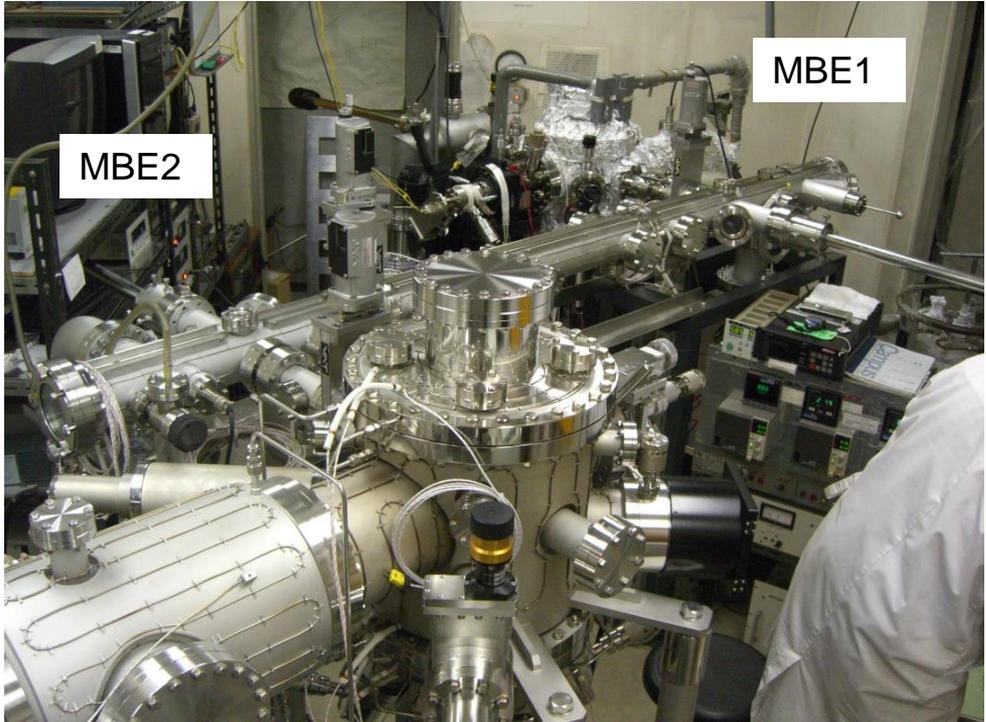
格子不整合歪 → 2D成長から3D成長へ遷移



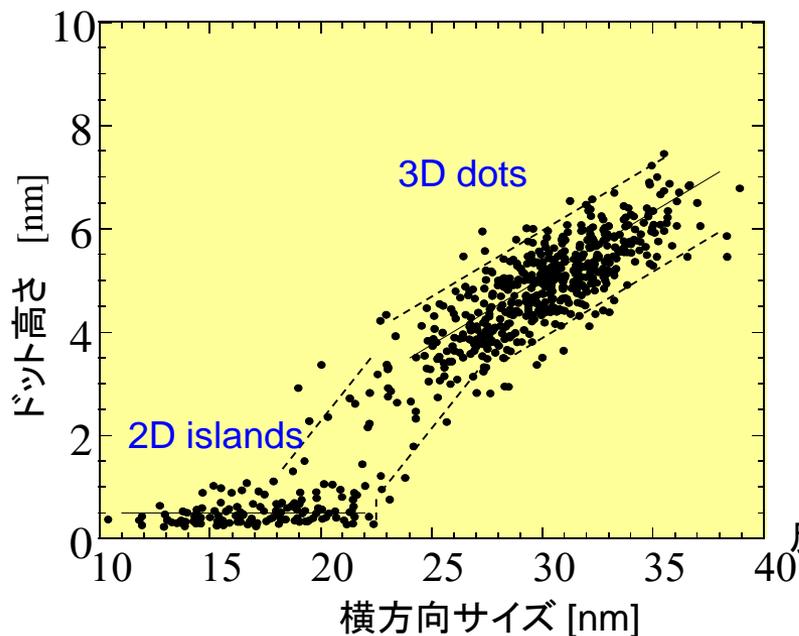
分子線エピタキシー(MBE)



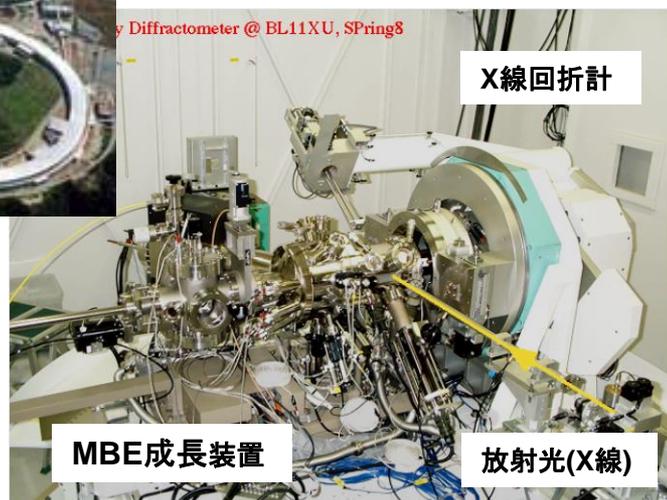
超高真空($\times 10^{-10}$ Torr)下で、高純度原料を分子線にして基板表面に照射し、単結晶薄膜を成長する。反射型高速電子線回折(RHEED)により、成長表面構造をリアルタイム観察する。



量子ドット形成メカニズムの解析



High-resolution X-ray Diffractometer @ BL11XU, SPring8

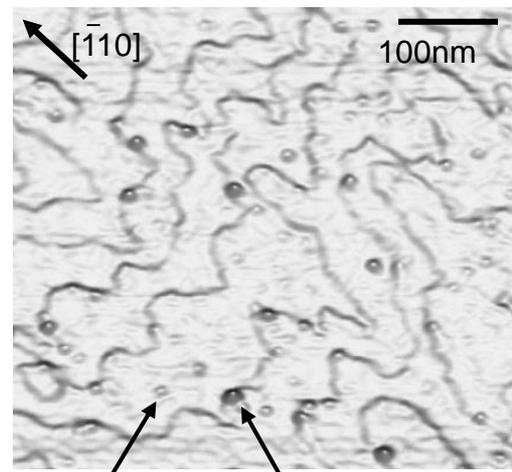
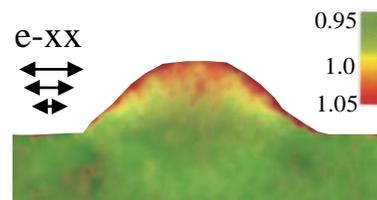


成長過程の解析

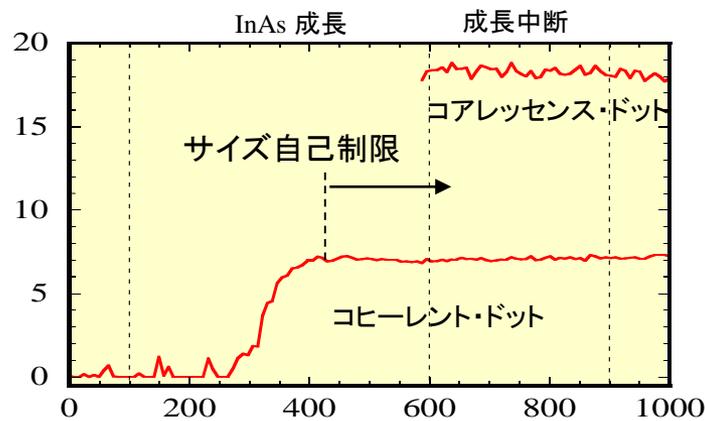


反射高速電子線回折

歪分布解析

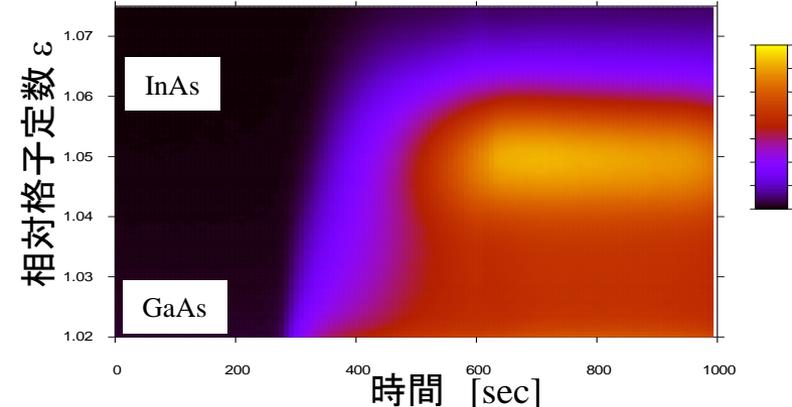


2D island 3D dot 核形成の解析

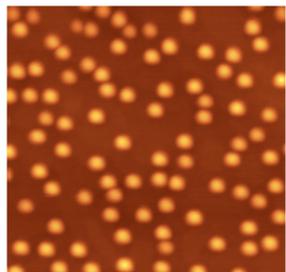
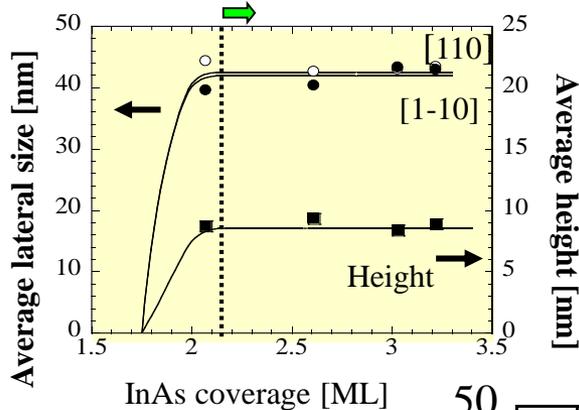


量子ドットの構造解析

- サイズ・形状
- 密度・配列
- 形成位置
- 量子準位
- 歪緩和



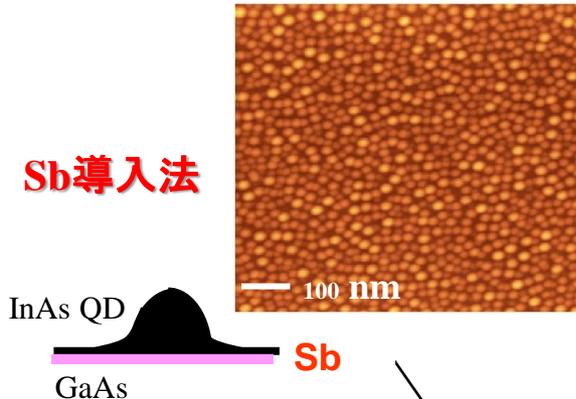
(2000年) 高均一量子ドット



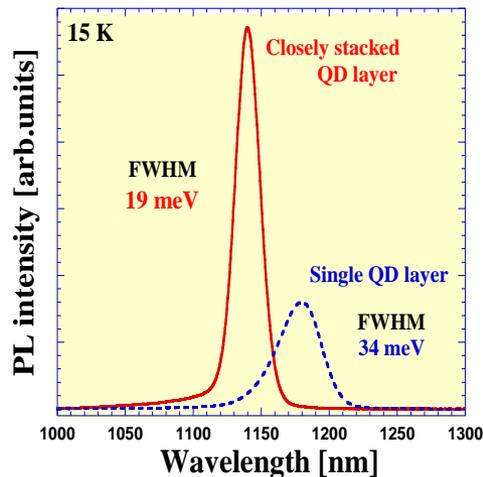
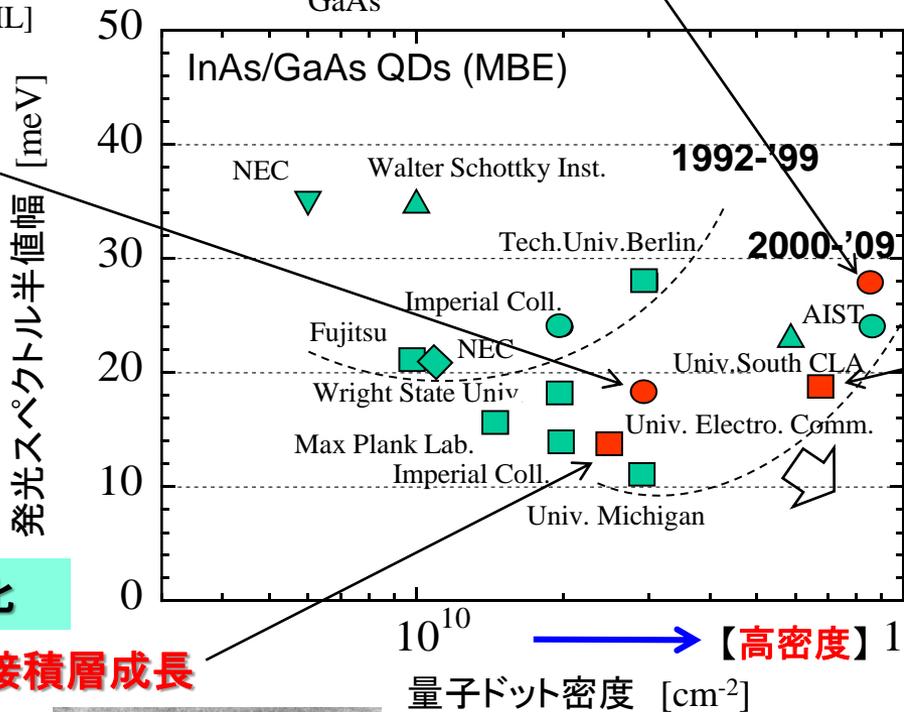
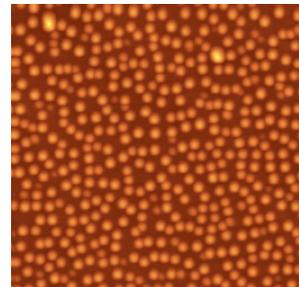
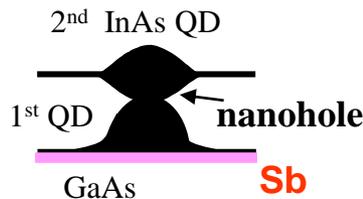
**ドットサイズ
自己制限効果**

(2005年) 高密度量子ドット

Sb導入法

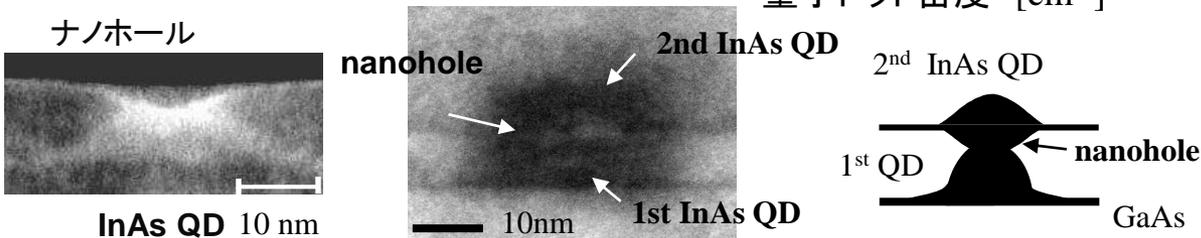


(2009年) 高密度・高均一化



(2006年) 高均一化

ナノホール上の近接積層成長



高均一

【高密度】

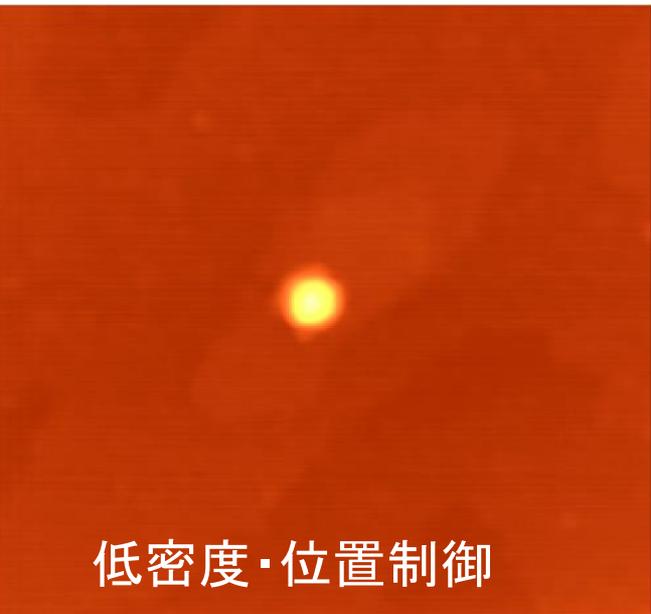
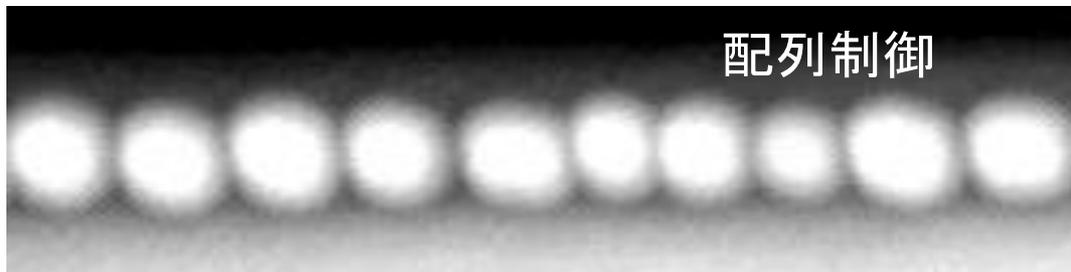


量子ドット国際会議で受賞

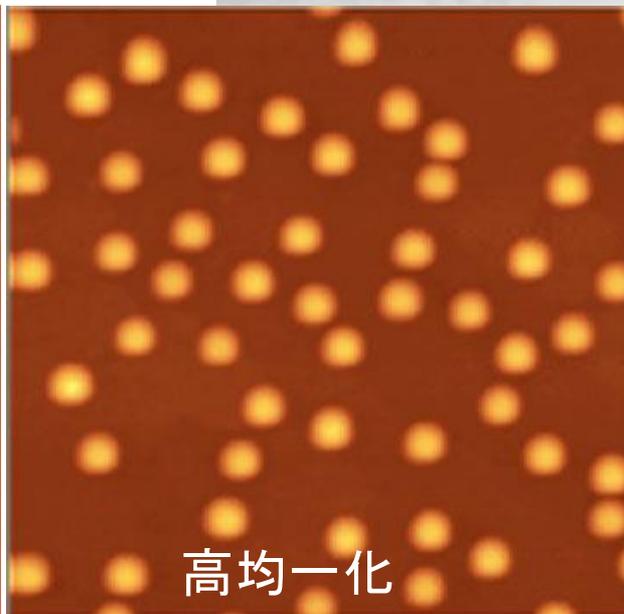
量子ドット作製技術の進展

Yamaguchi Lab. 

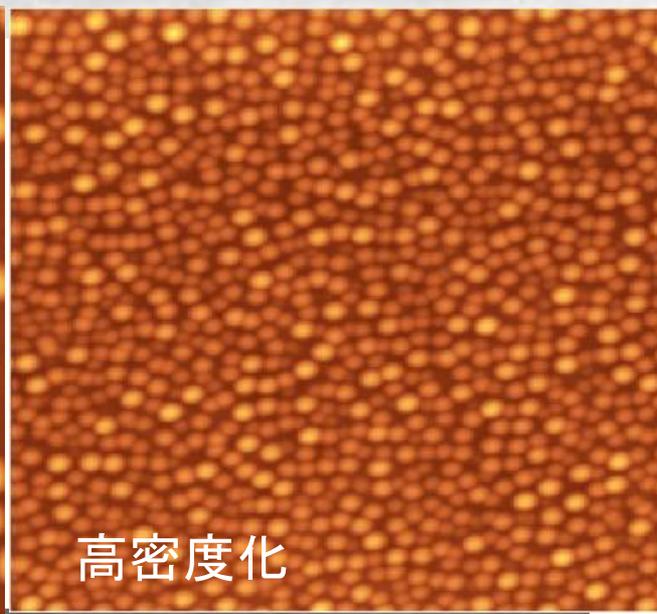
配列制御



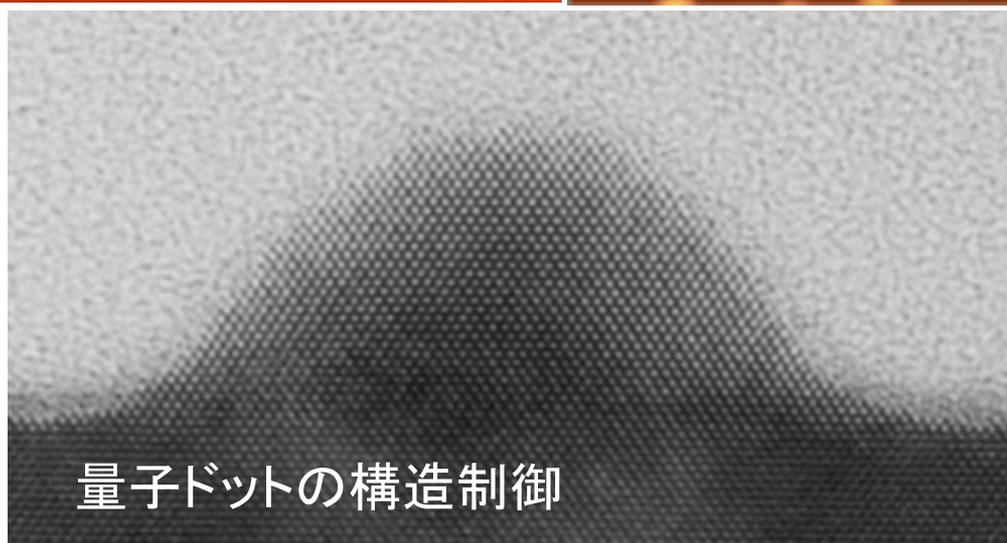
低密度・位置制御



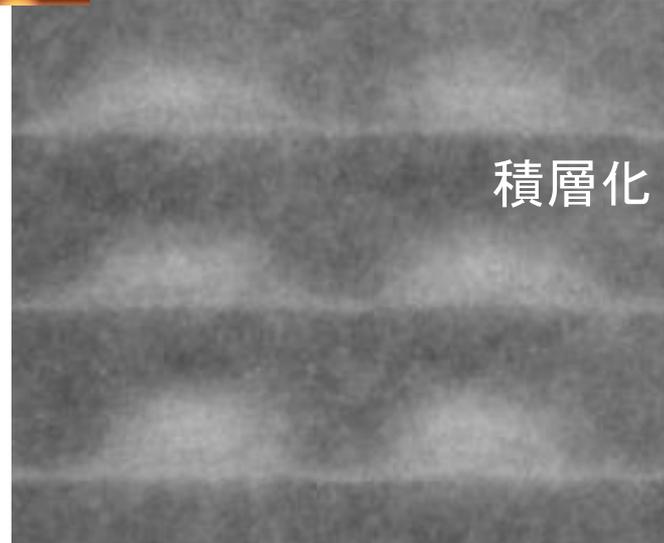
高均一化



高密度化



量子ドットの構造制御



積層化

量子ドット中間バンド型太陽電池

量子ドット太陽電池開発のプロジェクト研究（電通大・山口）

（平成20～26年度）（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）



新エネルギー技術研究開発

革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）

ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発（自己組織化量子ドット）

（平成27～31年度）（国）新エネルギー・産業技術総合開発機構（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

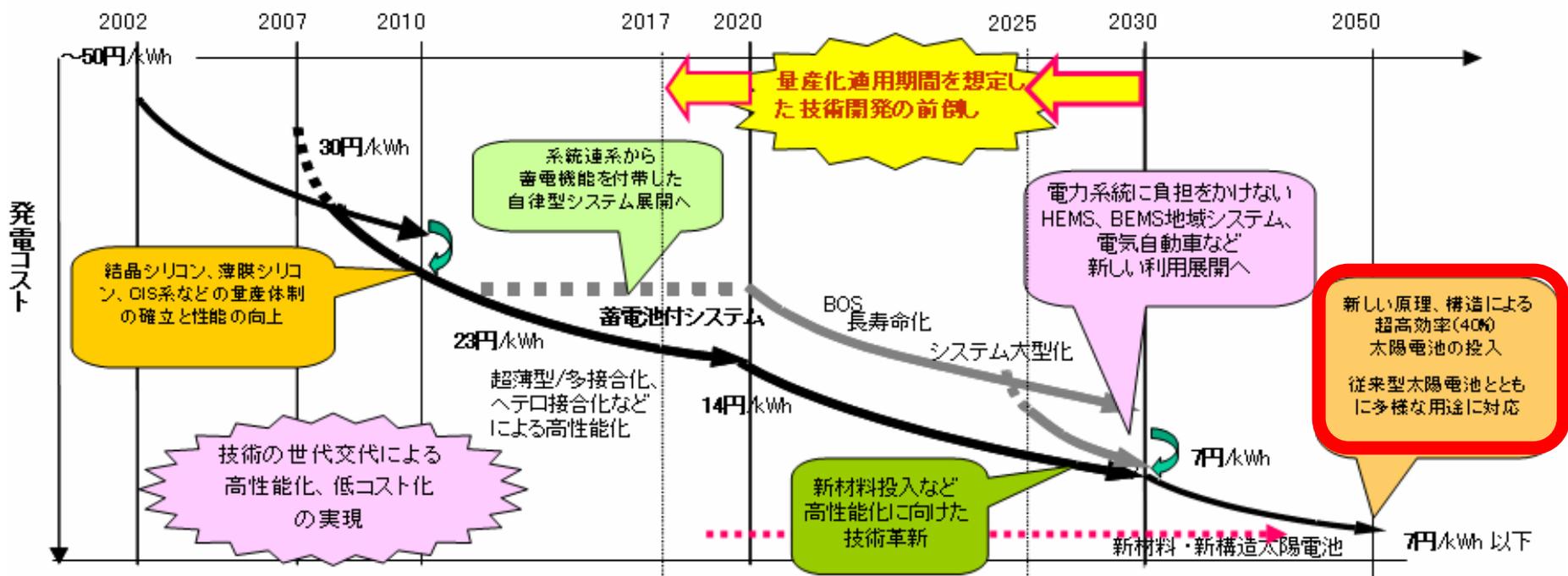
革新的新構造太陽電池の研究開発

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

（高密度量子ドット成長技術）

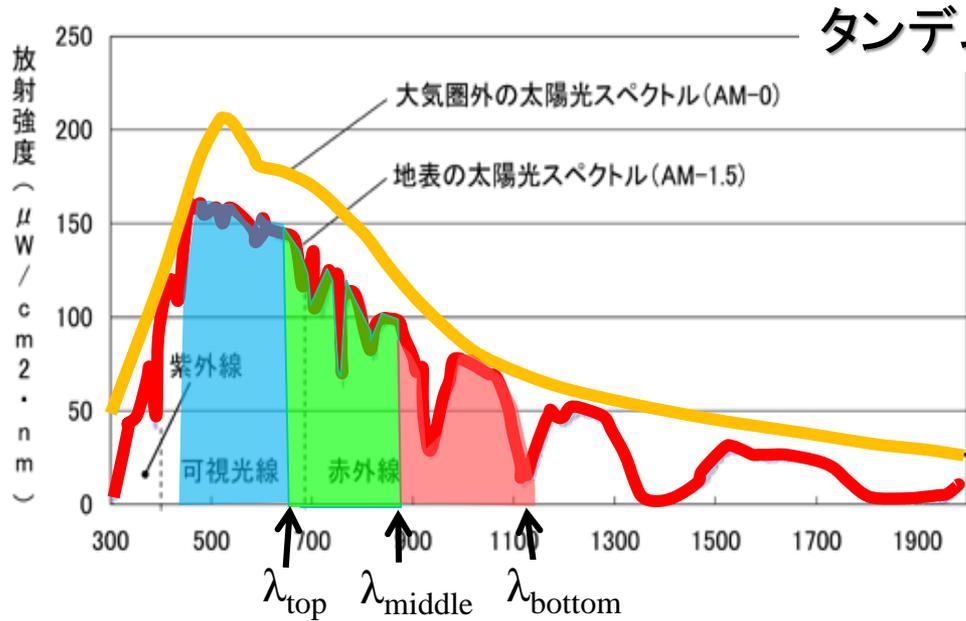
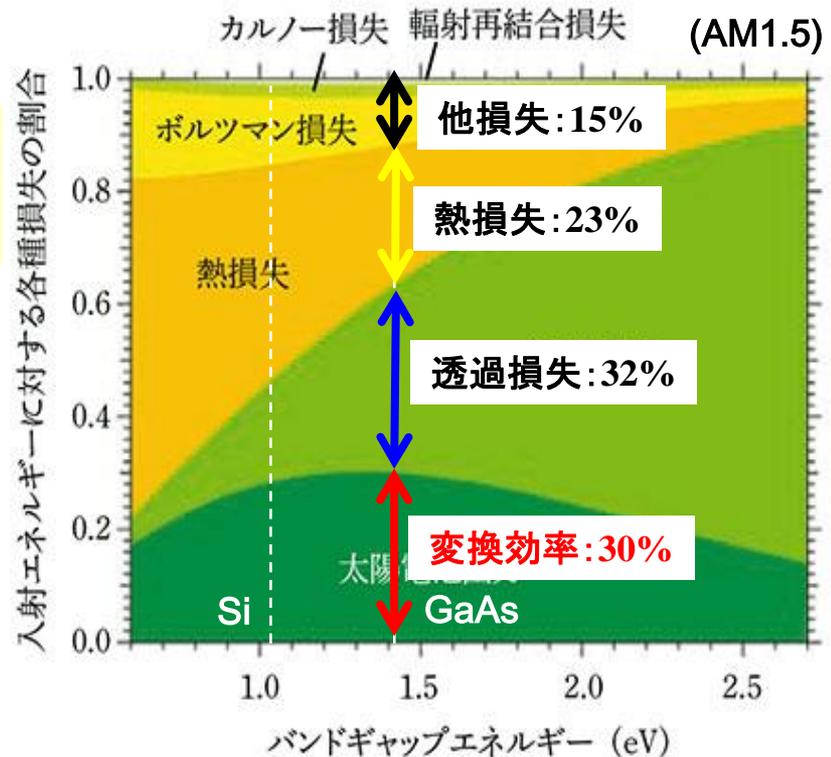
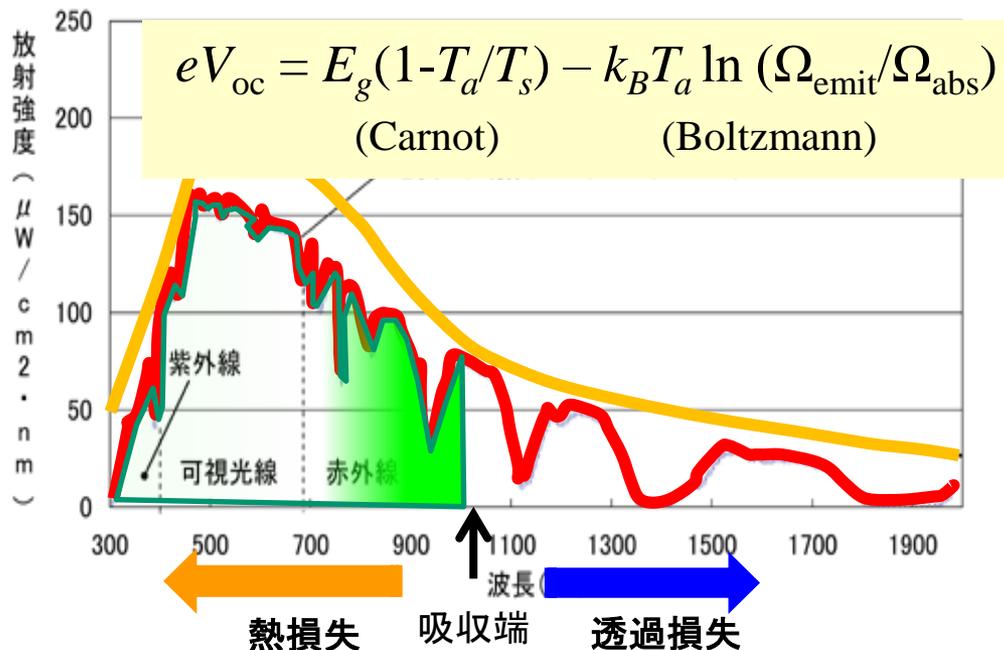


太陽光発電の今後の発展に対するロードマップ(PV2030+)のシナリオ (NEDO)

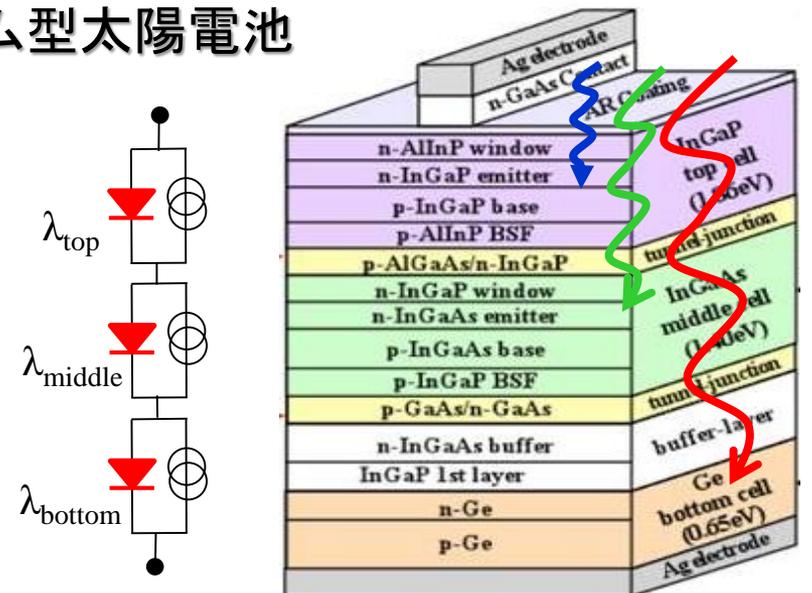


実現時期(開発完了)	2010年~2020年	2020年(2017年)	2030年(2025年)	2050年
発電コスト	家庭用電力並 (23円/kWh)	業務用電力並 (14円/kWh)	事業用電力並み (7円/kWh)	汎用電源として利用 (7円/kWh以下)
モジュール変換効率 (研究レベル)	実用モジュール16% (研究セル20%)	実用モジュール20% (研究セル25%)	実用モジュール25% (研究セル30%)	超高効率モジュール40%
国内向け生産量(GW/年)	0.5~1	2~3	6~12	25~35
(海外市場向け(GW/年))	~1	~3	30~35	~300
主な用途	戸建住宅、公共施設	住宅(戸建、集合) 公共施設、事務所など	住宅(戸建、集合)公共施設、 民生業務用、電気自動車など充電	民生用途全般 産業用、運輸用、 農業他、独立電源

単接合太陽電池における損失



タンデム型太陽電池



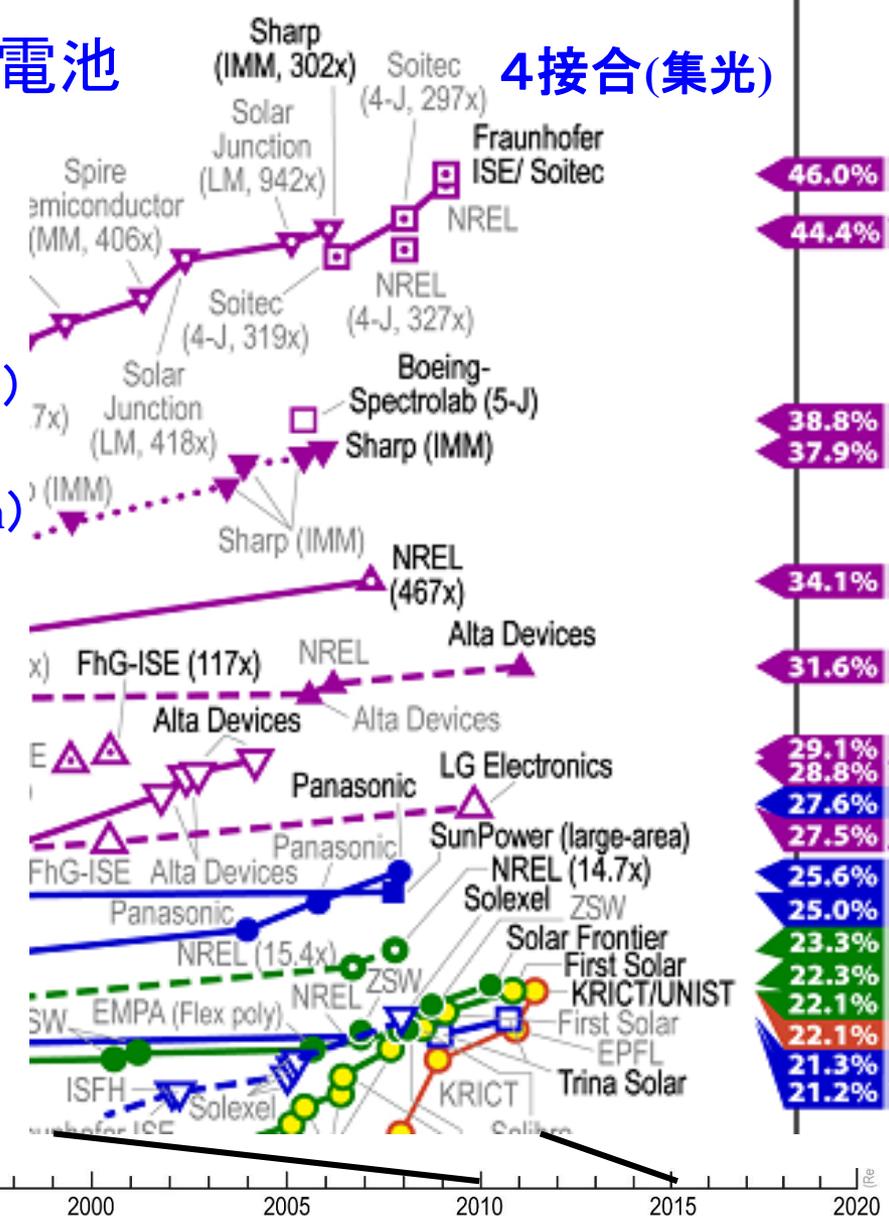
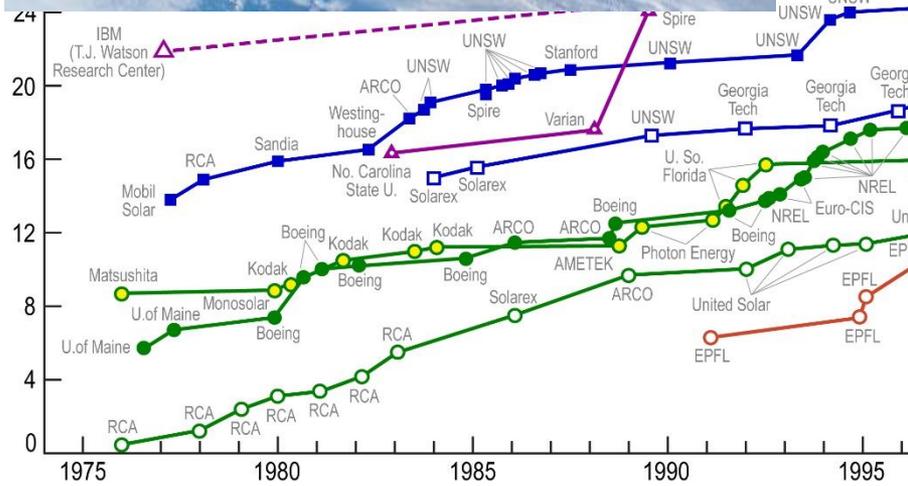
タンデム型太陽電池

4接合(集光)

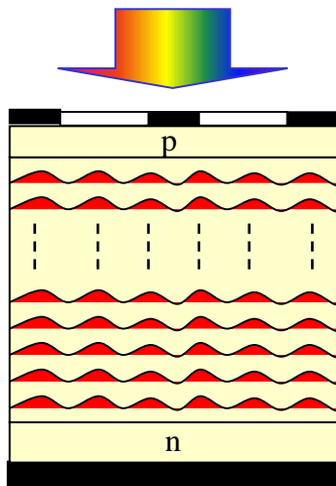


(集光)
3接合
(1sun)

Efficiency (%)



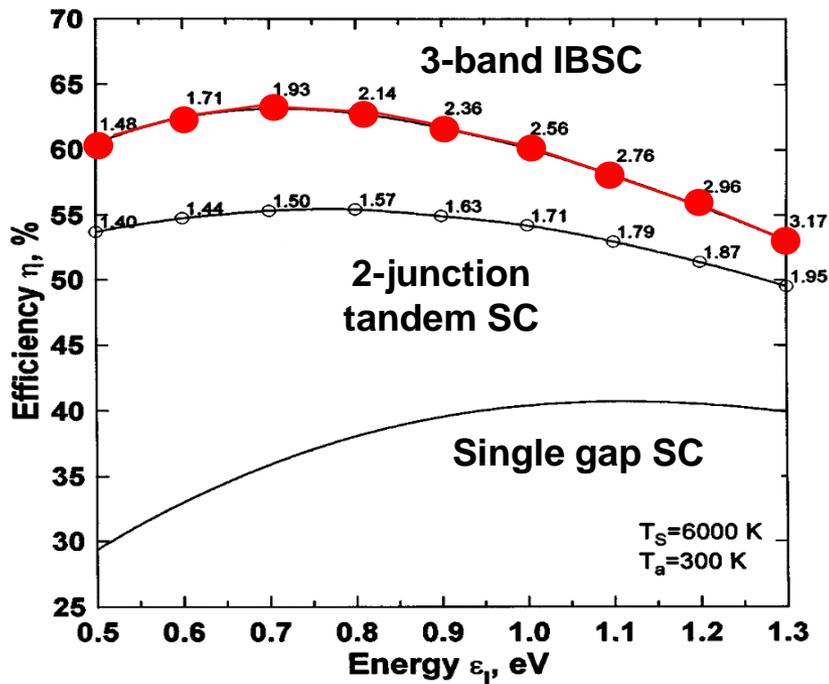
量子ドット中間バンド型太陽電池



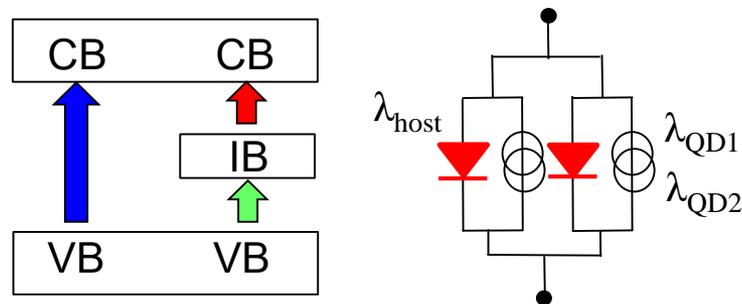
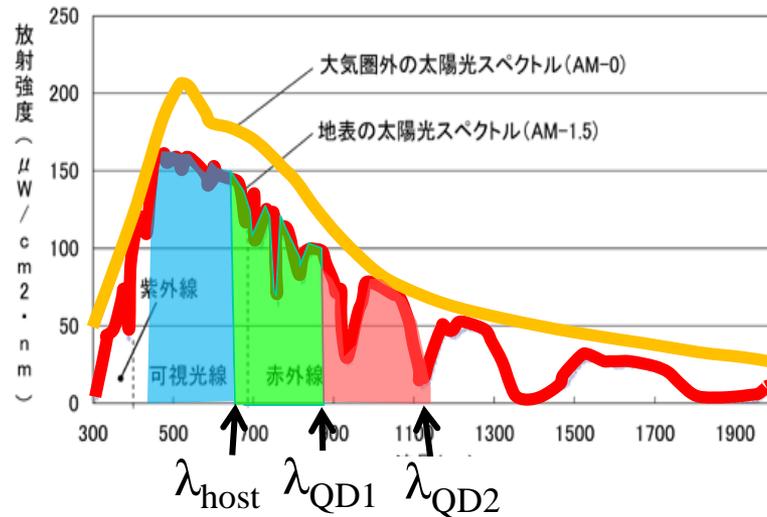
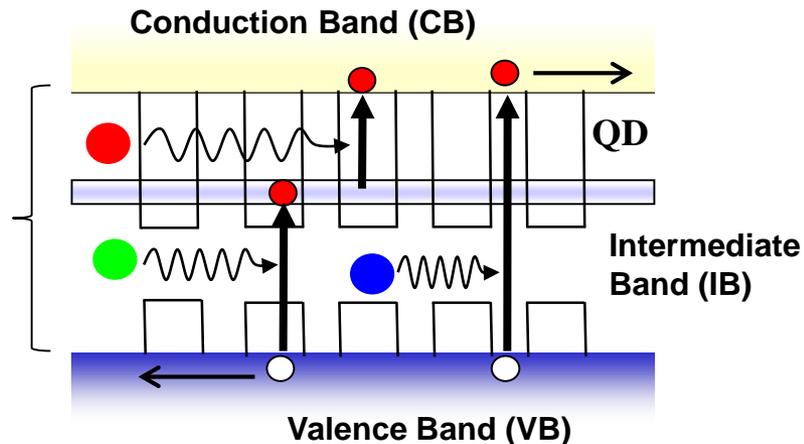
量子ドット
超格子

中間バンドを介した
2段階光励起
(VB → IB → CB)

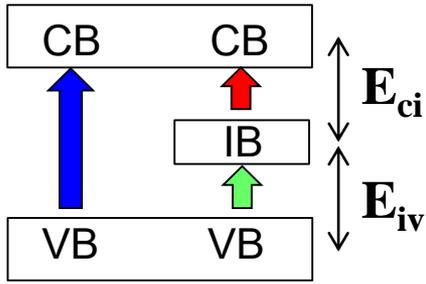
詳細平衡モデル計算
変換効率: **63%**



A. Luque and A. Marti, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 5014 (1997).



量子ドット中間バンドの設計(理論計算)

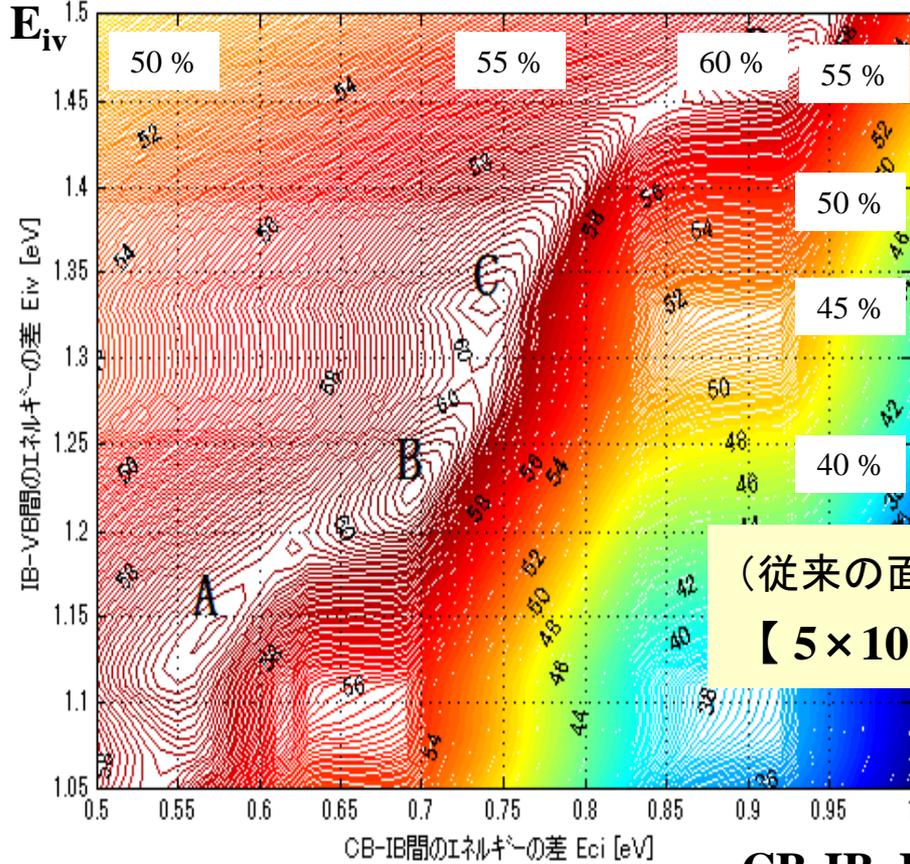


高効率化には、
量子ドット密度はどのくらい必要か？

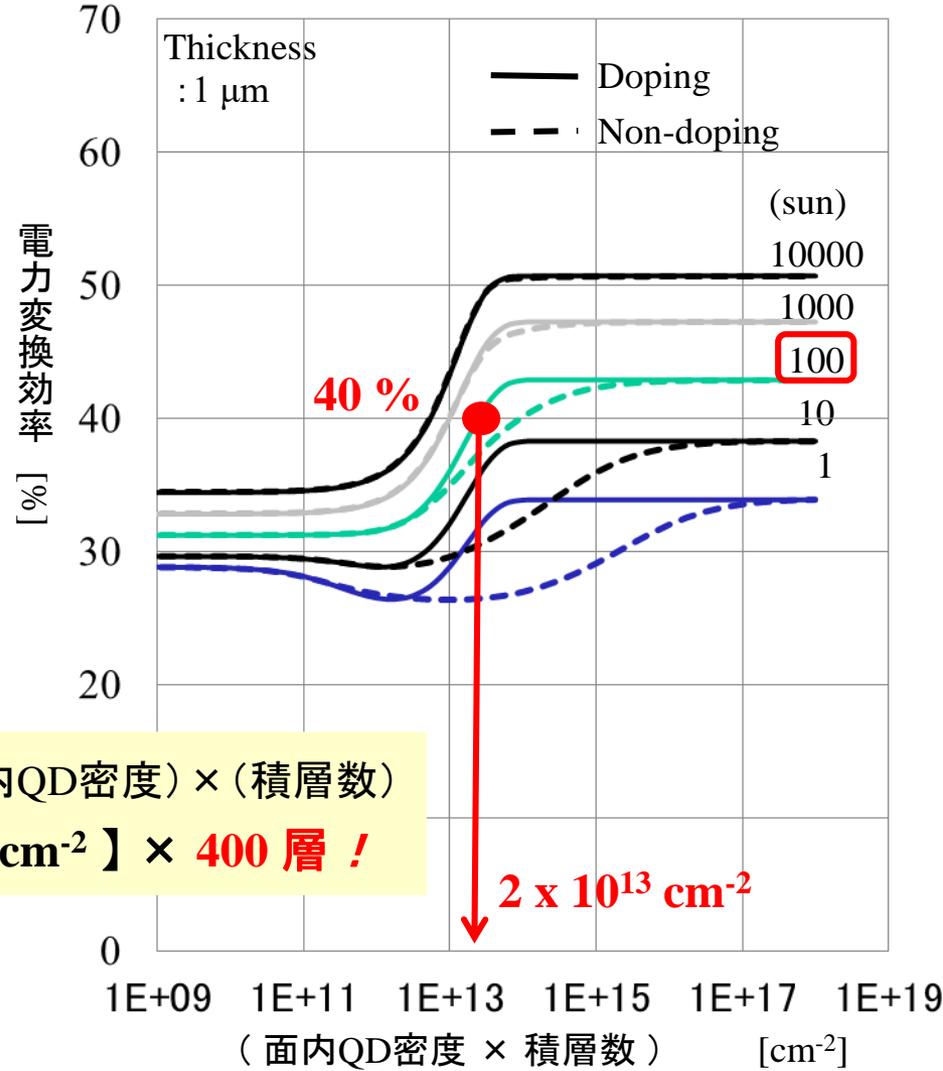
InAs QDs /GaAs(Sb) $\left\{ \begin{array}{l} E_{ci} = 0.322 \text{ eV} \\ E_{iv} = 1.098 \text{ eV} \end{array} \right.$

IB-VB

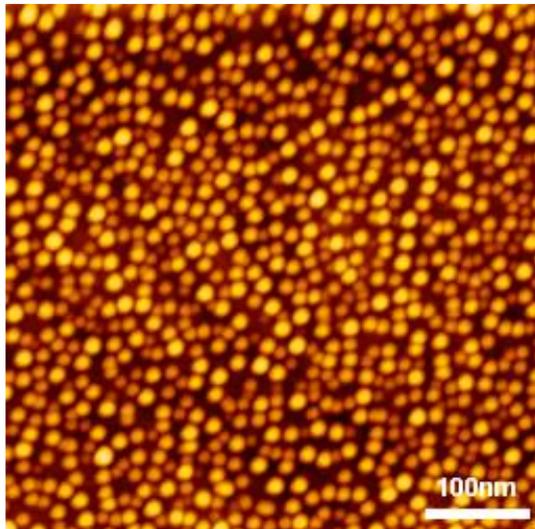
AM 1.5D
1000 suns



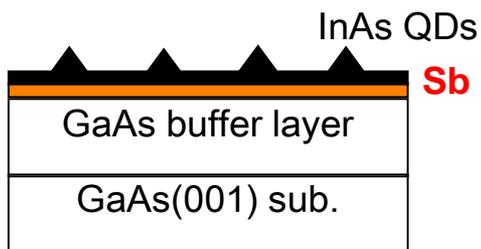
(従来の面内QD密度) × (積層数)
【 $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 】 × **400 層!**



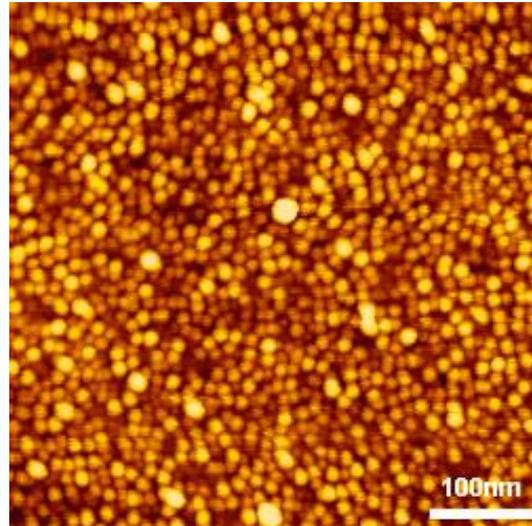
Sb-Mediated MBE Growth of Ultrahigh-Density InAs QDs



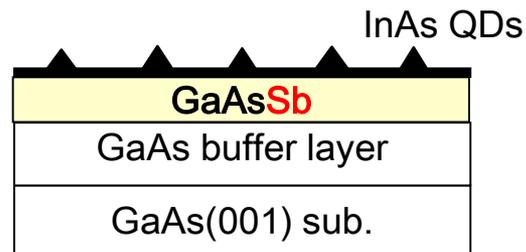
$3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$



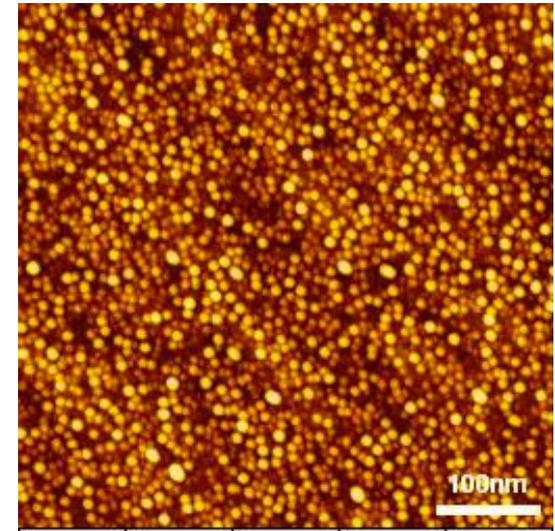
K. Yamaguchi, et al.,
J. Cryst. Growth, **275** (2005) e2269.



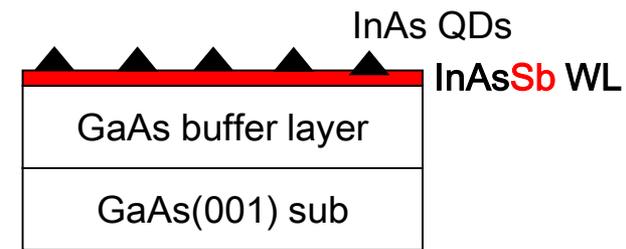
$5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$



E. Saputra et al.,
Appl. Phys. Express, **5** (2012)125502.



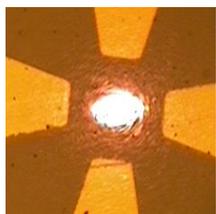
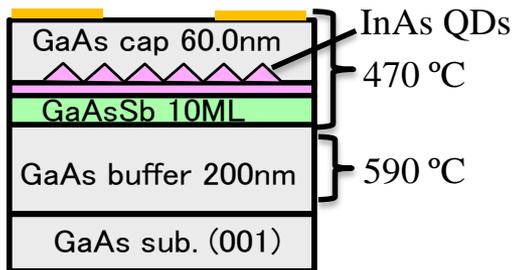
$1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$



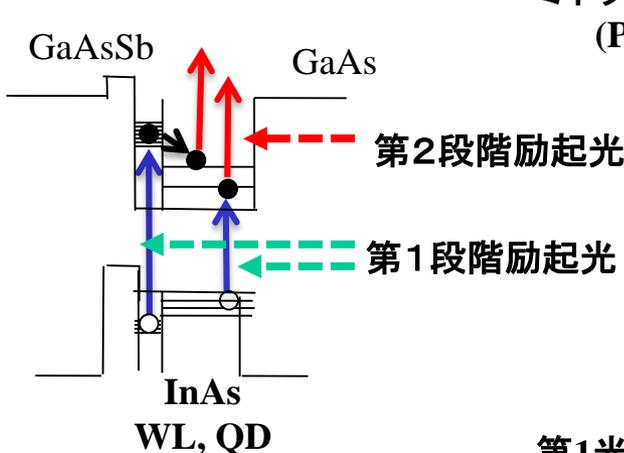
K. Sameshima, et al.,
Appl. Phys. Express, **9**, (2016) 075501.

2段階光励起効果の検証実験

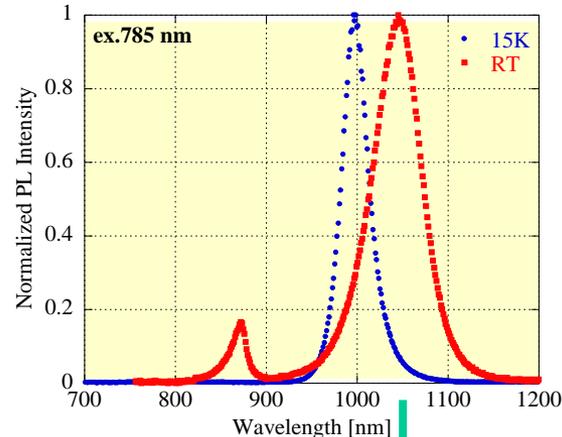
Au/AuGe



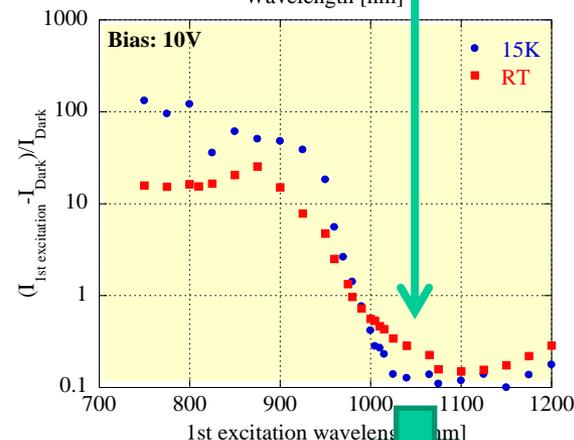
光電流
測定用素子



フォトル
ミネッセンス
(PL)

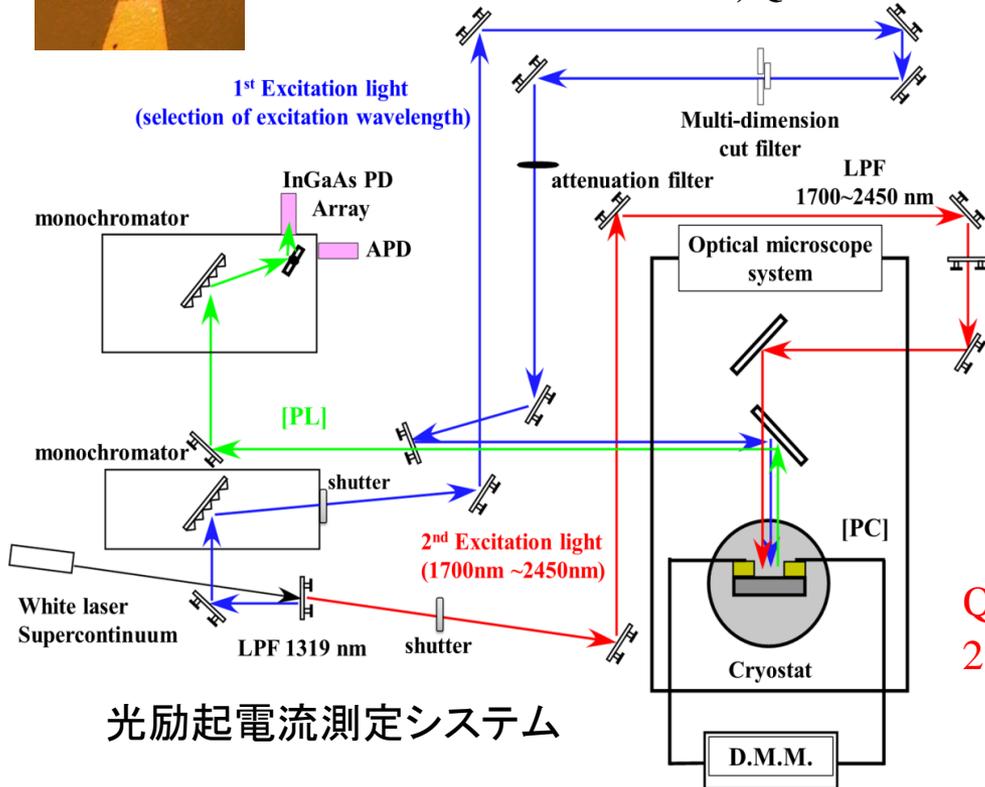
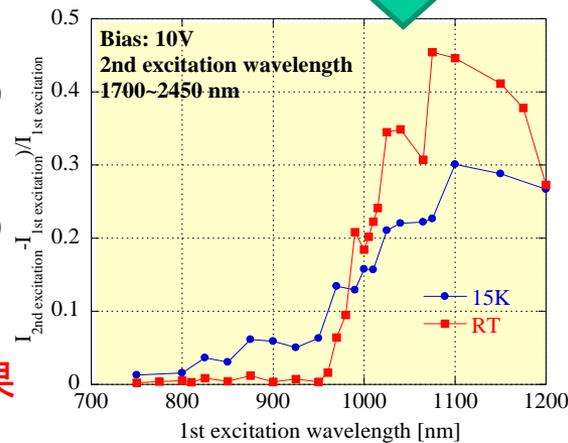


第1光励起
電流



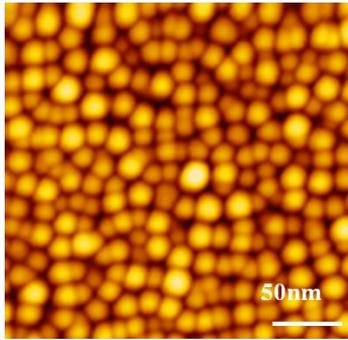
第1光励起
(1000-1200 nm)
+
第2光励起
(1700-2450 nm)

QD準位を介した
2段階光励起効果

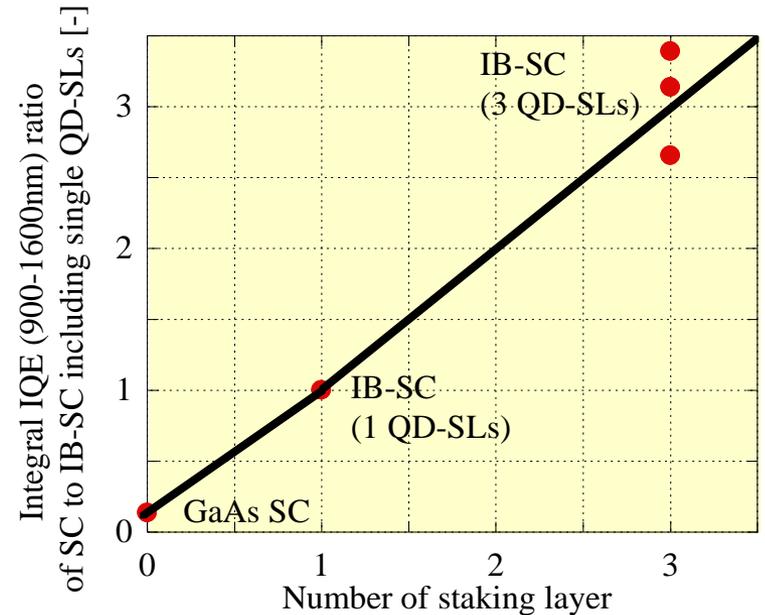
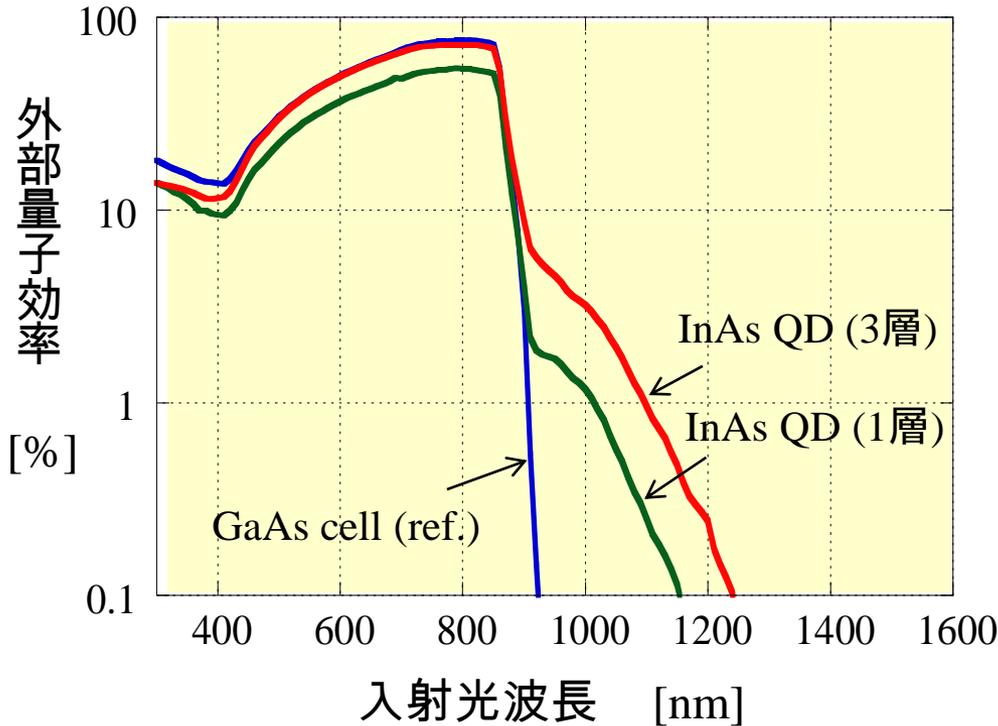
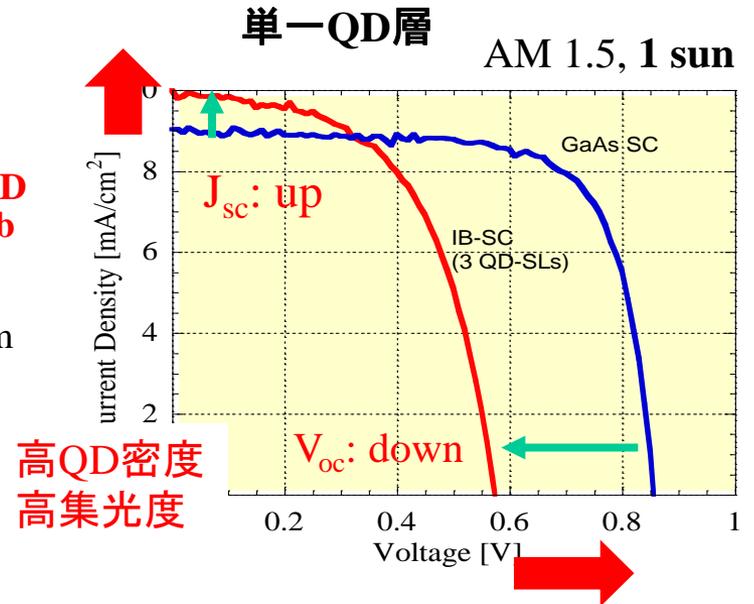
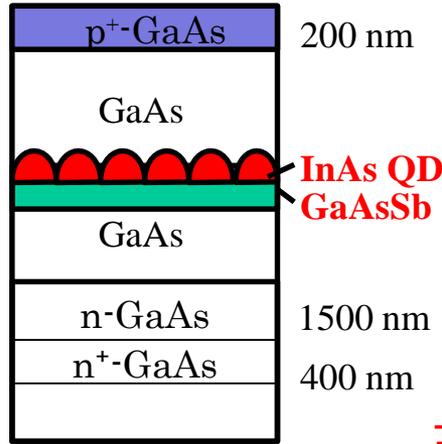


光励起電流測定システム

面内超高密度InAs量子ドットを導入した太陽電池の試作



InAs QD density
: $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$



★太陽光から発電・水素生成・貯蔵そして発電（クリーンテック）



太陽光 ⇒ 水の電気分解 ⇒ 水素生成 ⇒ 水素燃料貯蔵
 (光エネルギー) → (電気エネルギー) → (化学エネルギー)

太陽電池

燃料電池

水素燃料貯蔵

水素と酸素の化学反応

(化学エネルギー) → (電気エネルギー)

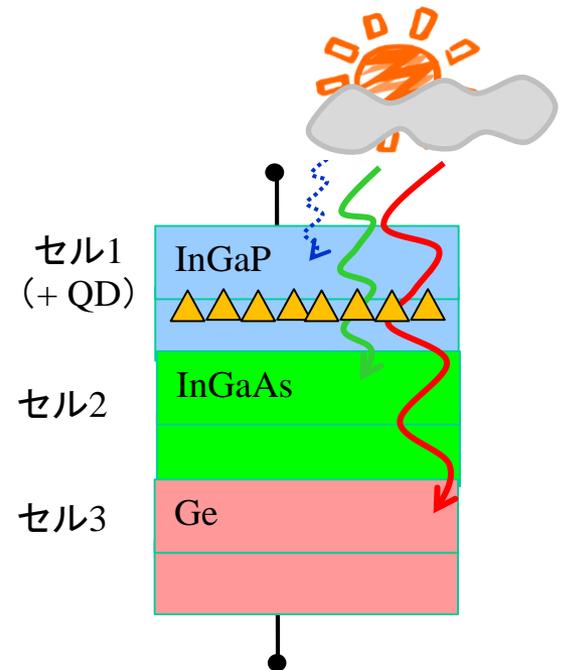
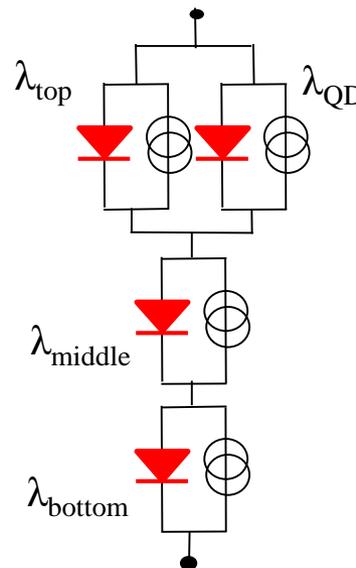
電気, 水

集光型タンデム太陽電池(31%)と水の電気分解の組み合わせ:

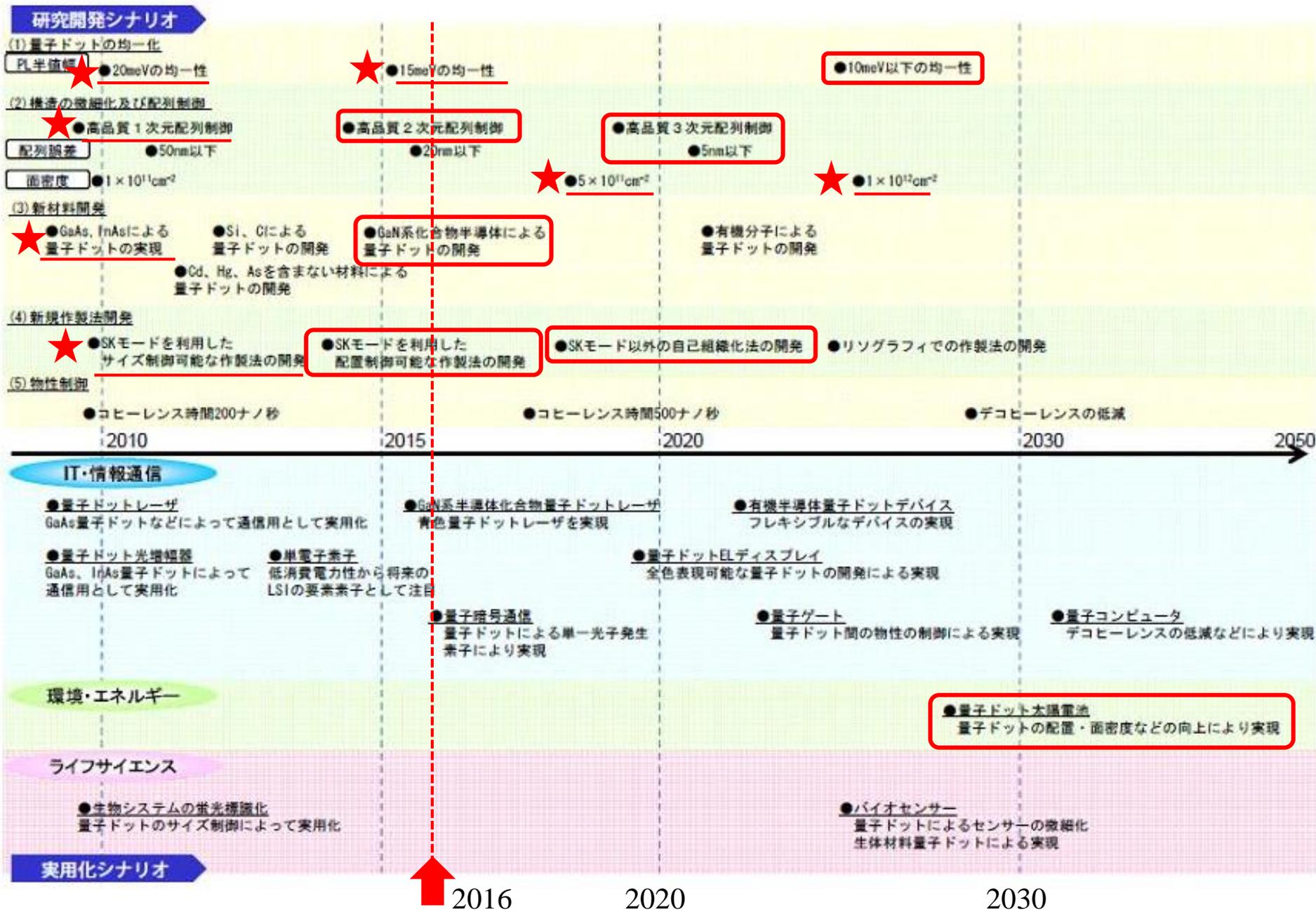
水素製造の変換効率(模擬太陽光実験): 24.4% (東大・宮崎大)

タンデム型セル
 量子ドット中間バンド型セル
 の組み合わせ

天候の影響を受けやすいトップセルに
 量子ドット中間バンドの導入



経産省作成「技術戦略マップ2009ナノテクノロジー・材料①ナノテクノロジー分野」より



REVIEW

Recent progress on quantum dot solar cells: a review

Tomah Sogabe,^{a,b} Qing Shen,^{a,b} and Koichi Yamaguchi^{a,b,*}

^aUniversity of Electro-Communications, Info-Powered Energy System Research Center,
1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

^bUniversity of Electro-Communications, Department of Engineering Science,
1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

Quantum-dot intermediate-band solar cell

Colloidal quantum dot solar cell

量子ドットテクノロジーの展開



原子レベルの物質の創製

⇒ 原子の性質に基づいた量子デバイス

⇒ エネルギー・環境・安心・安全の社会へ

- ・ 情報通信の高度化: 量子ドットディスプレイ、量子ドット光源
- ・ 超低消費電力化: 単電子デバイス、量子ドットレーザ
- ・ エネルギー変換の高効率化: 量子ドット太陽電池
- ・ 高セキュリティ化: 単一光子発生器

次世代のクリーンテック開発へ

ご清聴、ありがとうございました。