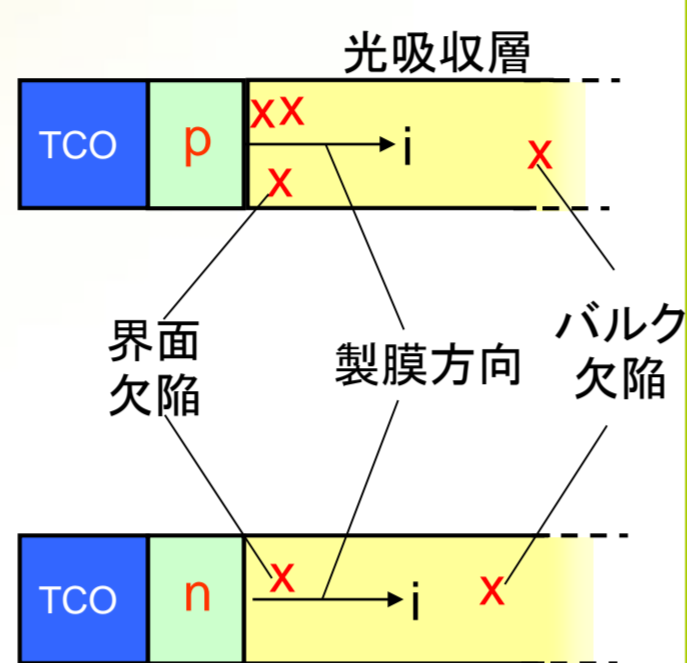


アモルファスシリコン太陽電池の局在準位評価

Adrien Bidiville、松井 卓矢、齋 均、松原 浩司
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進プロセスチーム

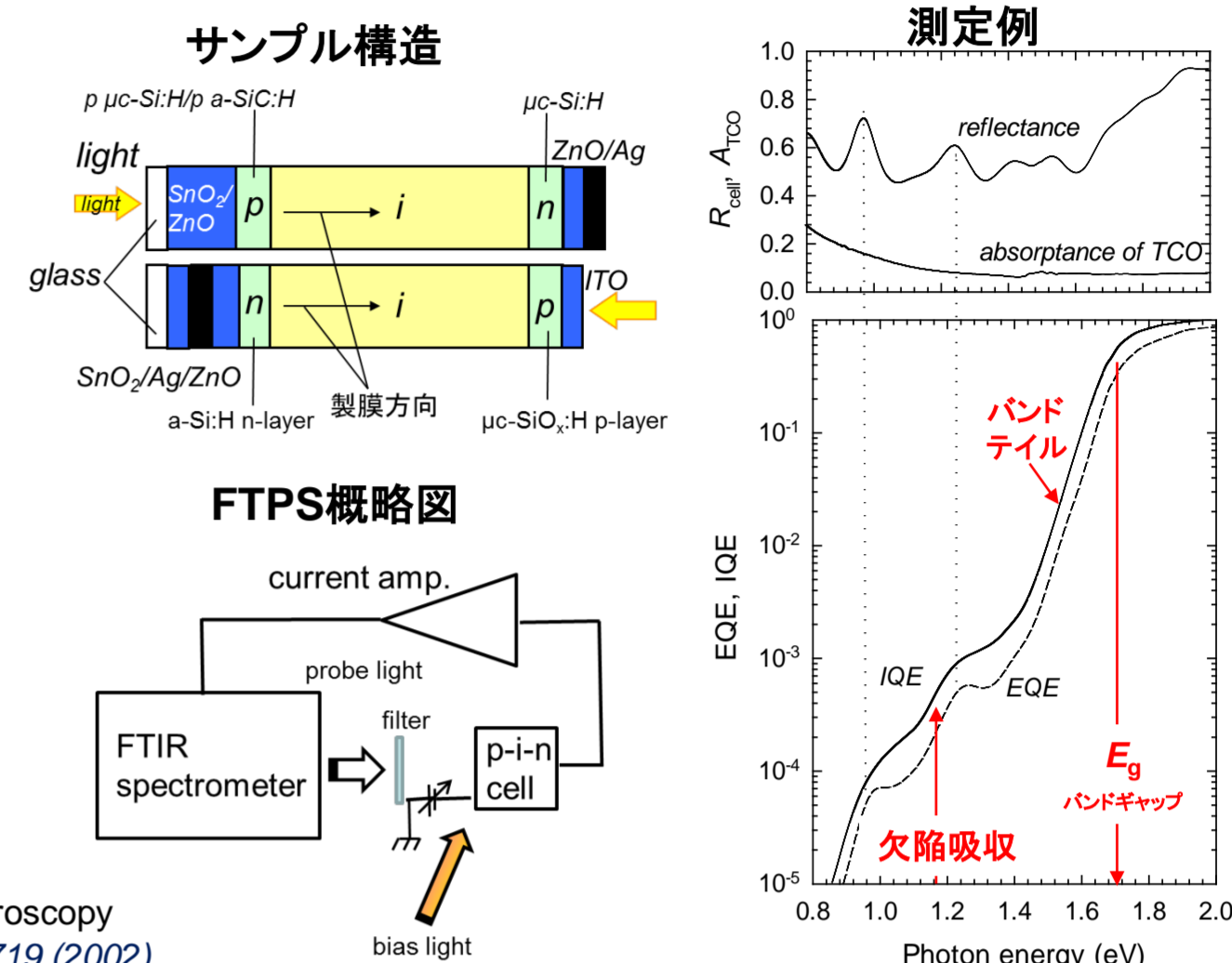
研究の目的

水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)には初期欠陥や光誘起欠陥、バンドテイルなどの局在準位が存在し、これらがセル特性に影響を及ぼすことが知られている。しかし、a-Si:Hが太陽電池デバイスに組み込まれた際、これらの局在準位が空間的にどのように分布し、バルクや界面の局在準位がセル特性にどのような影響を与えるかについては実験的に解明されていない。本研究では、p-i-n型(またはn-i-p型)太陽電池の光吸収層(i層)の局在準位をセル構造で評価することで、局在準位とセル特性の関係を調査した。



太陽電池の局在準位評価(FTPS)

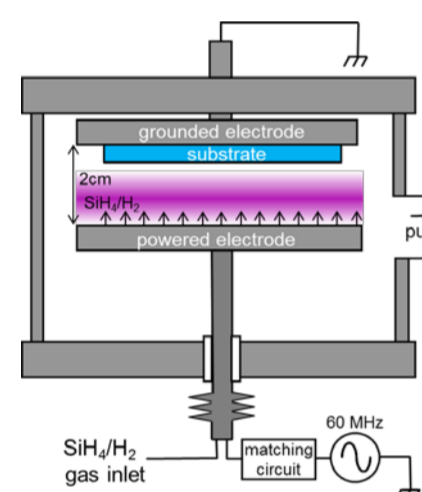
- 実デバイスで評価。
- セルのEQE($\lambda < 800$ nm)とFTPS*($\lambda > 700$ nm)、反射スペクトルを用いてサブバンドギャップ領域のIQE(内部量子効率)を評価。
- IQE($E_g - 0.5$ eV)を欠陥に起因する吸収(欠陥量)と定義。
- 非常に薄いセル($t \sim 10$ nm)まで評価が可能。



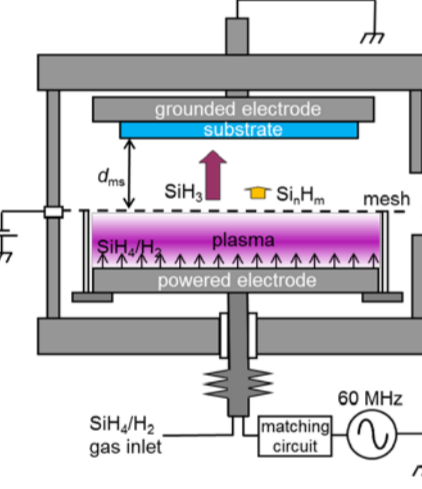
*Fourier transform photocurrent spectroscopy
M. Vanecek and A. Poruba, APL 80, 719 (2002).

シリーズ1: バルク欠陥が支配的な最適化a-Si:H p-i-nセル (i層膜厚依存性)

ダイオード型プラズマCVD

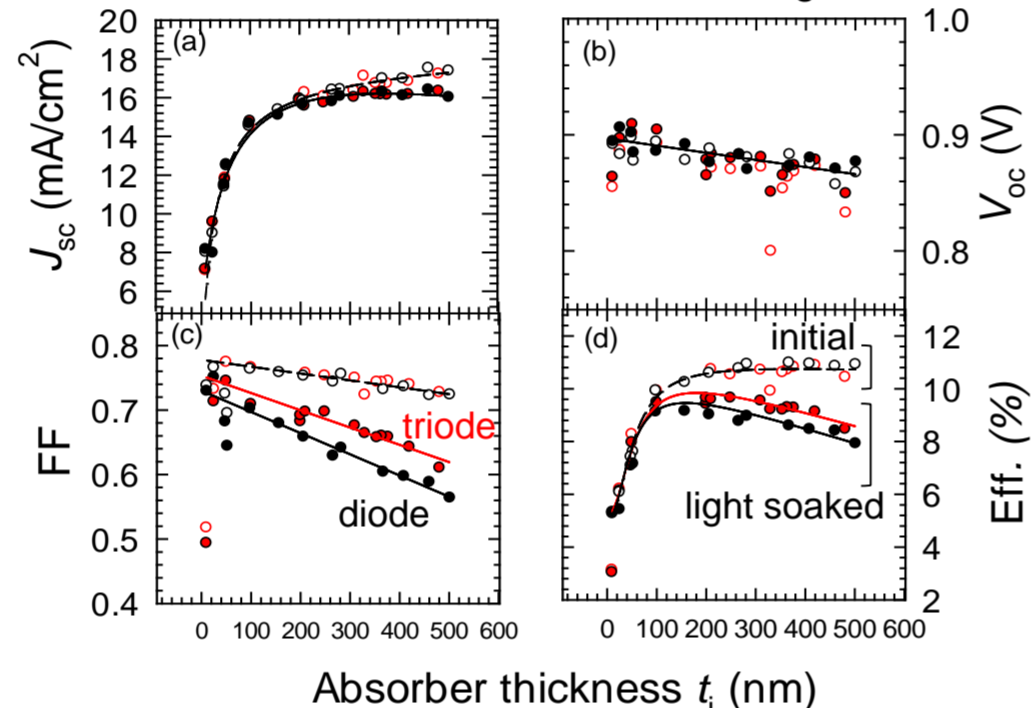


トライオード型プラズマCVD



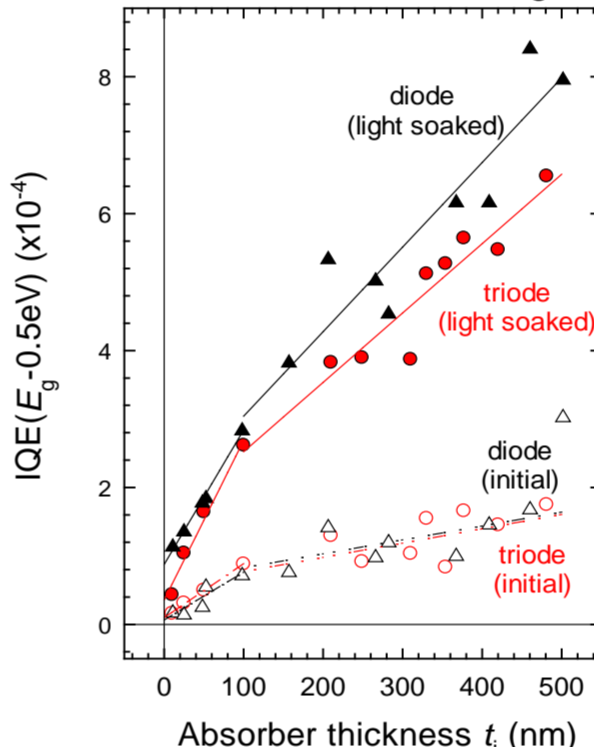
T. Matsui et al., APL 106, 053901 (2015).

セル特性の膜厚依存性 ($T_s = 200^\circ\text{C}$)



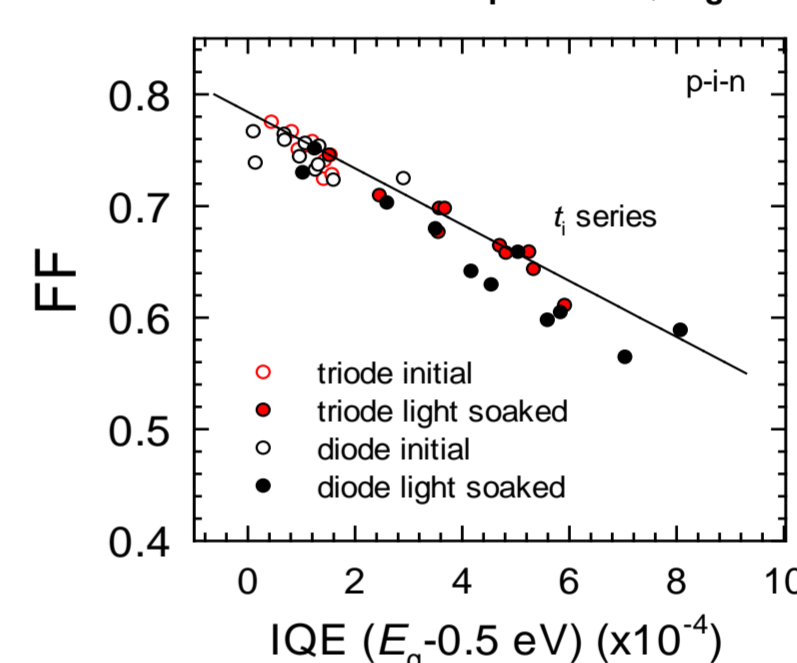
- 2種類の製膜法(ダイオードおよびトライオード)を用いてi層を製膜(同一チャンバー、ほぼ同じ製膜条件)。
- ダイオードではできるだけ低い製膜速度で製膜(< 0.1 nm/s)。
- 光劣化後のFFの膜厚依存性にトライオードの優位性が確認できる。

欠陥量の膜厚依存性 ($T_s = 200^\circ\text{C}$)



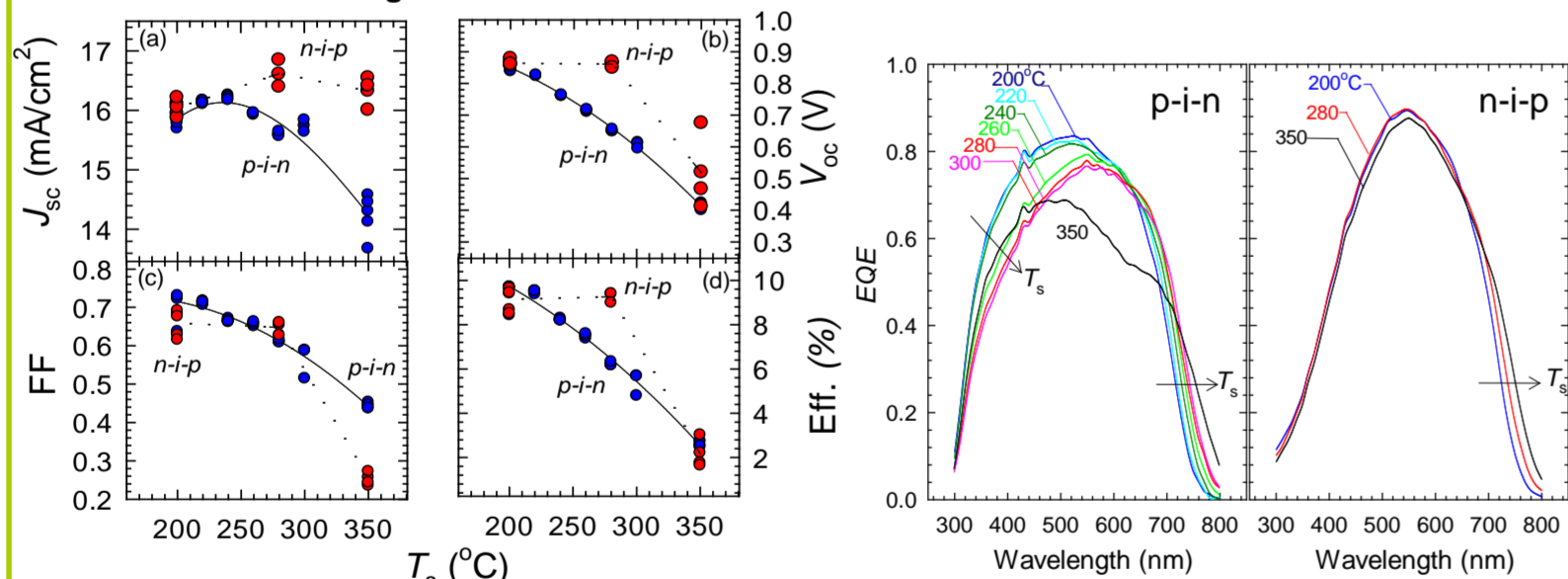
- 初期・光誘起欠陥量は膜厚に対してほぼ直線的に増加⇒傾きが欠陥密度に相当し、直線性から欠陥はバルク様に分布していると考えられる。
- トライオードで作製したa-Si:Hの光劣化後の欠陥密度はダイオードで作製したものに比べて約2割少ない。
- セルのFFは光吸収層内の欠陥の総量に支配され、膜厚や光劣化の前後、製膜方法によらない(裾準位一定の場合)。 A. Bidiville et al., JAP 118, 184506 (2015).

欠陥量とFFの関係 (t_i series, $T_s = 200^\circ\text{C}$)



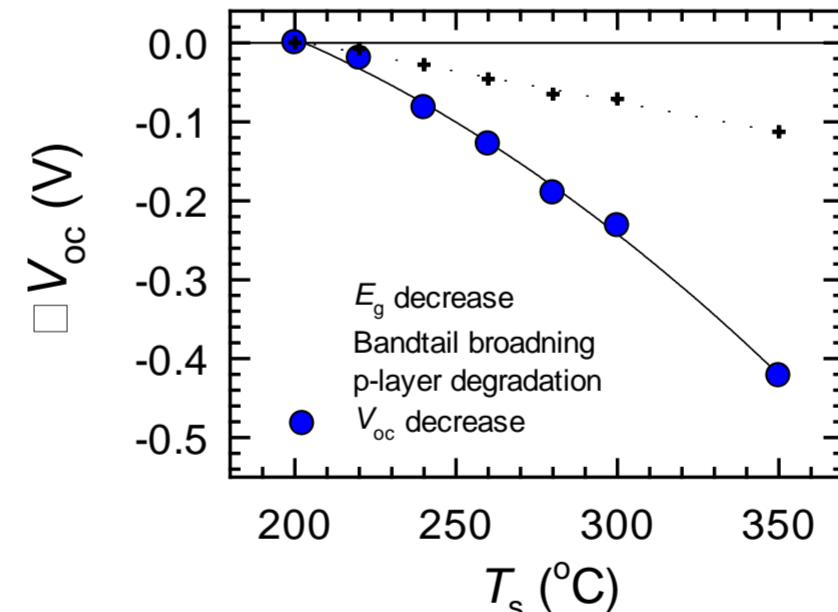
シリーズ2: 界面の局在準位が支配的なa-Si:H p-i-nセル (i層製膜温度依存性)

セル特性、 E_g 、局在準位(Urbach energy: E_u 、欠陥量)のi層製膜温度依存性 ($t_i = 250$ nm)



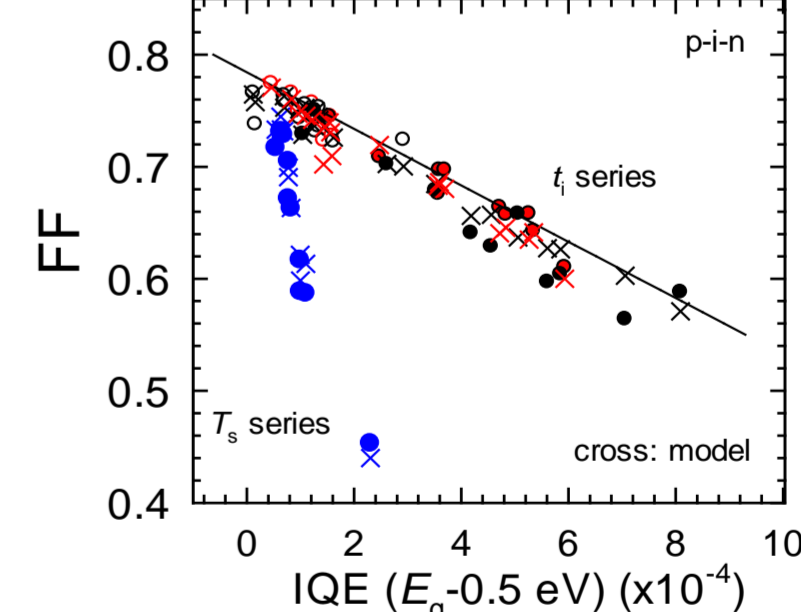
- p-i-nセルはn-i-pセルに比べて温度耐性(製膜温度・アニール温度)が低い。(図は製膜温度依存性)
- 高温プロセス+ p層との接合により、i層の局在準位(特にバンドテイル)が増大することを観測した。
- i層のフェルミレベルが価電子帯に漸近すると、水素脱離が促進し(Raman評価より)、局在準位がより増大することが示唆される。

V_{oc} のロス解析 ($t_i = 250$ nm)



- p層、p-i層製膜後に高温アニールを施す試験により、各層の変化がセル特性に与える影響を解析。
- V_{oc} のロスは(1)p層の熱ダメージと(2)i層のバンドテイルブロードニング、(3)i層のナローギャップ化で定量的に説明できる。

FFと欠陥量の関係(t_i , T_s seriesとモデル値)



- FFの欠陥量依存性は、上記膜厚シリーズと異なる挙動を示す。
- 解析から、a-Si:H p-i-nセルのFFは欠陥量以外にバンドテイルとセルの開放電圧に強く依存することがわかった。

結論

- FTPSによる太陽電池光吸収層の局在準位評価から、最適化セル($T_s = 200^\circ\text{C}$)の初期欠陥および光誘起欠陥はバルク様に分布し、顕著な界面欠陥は観測されなかった。
- 一方、高温($> 200^\circ\text{C}$)プロセスで作製したセルでは、p-i-nセルはn-i-pセルに比べてバンドギャップの縮小とバンドテイルの増大が顕著であることが明らかとなった。
- i層のフェルミレベルが価電子帯に漸近する領域(p-i界面)で水素脱離が促進され、界面の局在準位が増大することが示唆された。
- 太陽電池のロス解析から、 V_{oc} はバンドギャップの他、バンドテイルの影響が大きいことがわかった。一方、FFは多くのパラメータ(欠陥、バンドテイル、 V_{oc})に依存し、これらのパラメータを用いたモデルから導出したFFと実験値の間に良い一致を示した。

謝辞

本研究の一部は、NEDOから委託された事業(高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発/太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発/薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発)のもとで実施した。また、成果の一部はPVTECとの共同研究で得た。関係各位に感謝する。