ナノ結晶シリコンを正孔選択性コンタクトに用いたヘテロ接合太陽電池の高性能化：ナノ結晶薄膜の成長とセル特性の関係

Improved silicon heterojunction solar cells by applying nanocrystalline silicon hole-selective contacts: Impact of nanocrystalline growth on cell performance

産総研　海汐 寛史、 齋 均、 鯉田　崇、○松井 卓矢

AIST, Hiroshi Umishio, Hitoshi Sai, Takashi Koida and ○Takuya Matsui

E-mail: t-matsui@aist.go.jp

【はじめに】Si ヘテロ接合(SHJ)太陽電池の高効率化に向けて、ドープ層の a-Si:H を nc-Si:H に置換えることで受光面の寄生光吸収ロスを低減する試みが様々な研究機関から報告されているが[1]、特にボロンドープ(*p*)nc-Si:H の最適膜厚は(*p*)a-Si:H よりも厚くなる傾向にあり、高い水準で従来を上回る性能が得られるかについては明らかにされていない。本研究では、(*i*)a-Si:H パッシベーション層上における(*p*)nc-Si:H（5-40 nm）の成長や正孔輸送の評価を行い、太陽電池特性の支配因子を調査した。また、産総研で作製する SHJ 太陽電池において(*p*)nc-Si:H の最適化を検討し、(*p*)a-Si:H を用いた参照試料との性能比較を行った。

【実験】(*p*)nc-Si:H や(*p*)a-Si:H 層は PECVD を用いて製膜した。(*p*)a-Si:H の製膜には励起周波数 13.56 MHz (RF)を使用し、(*p*)nc-Si:H には RF と 65 MHz (VHF)を用いた。*p* 層の導電率測定には、ガラス基板上に(*i*)a-Si:H (10 nm)と *p* 層を積層し、その後 Al コプラナ電極を蒸着したものを用いた。また、UV レーザー(λ=325 nm)を用いた Raman スペクトルの測定を行い、c-Si (520 cm^{-1})と a-Si (480 cm^{-1})の強度比(I_c/I_a)から(*p*)nc-Si:H の結晶性を評価した。太陽電池は *n* 型結晶 Si（平坦・テクスチャ）基板を用いて SHJ セルを作製し、発電特性を評価した。

【結果及び考察】

Fig. 1 に (a)暗導電率、(b)UV- Raman 強度比(以下、結晶化度と呼称)、平坦およびテクスチャ Si セルの(c) V_{oc}、(d)FF の *p* 層膜厚依存性を示す。Fig. 1 より、 (a)~(d)のすべてのパラメーターは *p* 層の膜厚とともに増加し、導電率と結晶化度が飽和する(*p*)nc-Si:H の膜厚は一致している (RF : ~30 nm、VHF : ~15 nm)。これは島状成長したナノ結晶同士の衝突により成長表面が完全に結晶で被覆される臨界膜厚(t_c)を反映している。一方、V_{oc}、FF が飽和する臨界膜厚（$t_c(V_{oc})$、t_c(FF)）との比較では、$t_c(V_{oc})$＜t_c(FF)~t_c の関係であることがわかった。これは、V_{oc} は p 層の導電率で律則（<10^{-4} S cm^{-1}）されているのに対し、FF はナノ結晶の表面被覆度に律則されていることが示唆される。また、(*p*)nc-Si:H の最適膜厚（≈t_c(FF)）は、セルの平坦・テクスチャにかかわらず、 (*p*)a-Si:H のそれより 3-5 倍厚いことがわかった。このように *p* 層の最適膜厚は材料や条件により異なるものの、(*p*)a-Si:H を(*p*)nc-Si:H に置換えることにより短波長領域の寄生光吸収ロスを低減することができ、J_{sc} は約 0.5 mAcm^{-2} 改善した。その他、(*p*)nc-Si:H を用いることによりパッシベーションの向上や TCO/*p* 界面のコンタクト抵抗の低減効果も得られ、従来の(*p*)a-Si:H を用いたセルの変換効率を 0.3-0.6%abs.上回る性能が得られた。さらに、TCO の改良を行うことで最大 23.5% の効率を得た[2]。世界最高値に較べると絶対値に課題は残るが、同条件での比較で(*p*)nc-Si:H のアドバンテージを示せたことに意義があるものと考えている。[1] *e.g.*, G. Nogay *et al.*, *IEEE J. Photovolt.* **6**,1654 (2016). [2] H. Umishio *et al.*, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* (2020).

【謝辞】本研究は NEDO 委託のもと実施した。

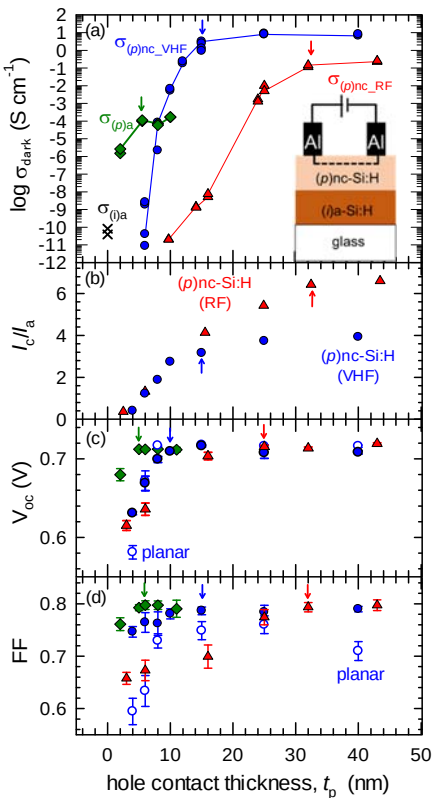

Fig. 1. Dependence of electrical, structural and solar cell properties on the thickness variation of the hole contact layer for different materials including (*p*)nc-Si:H deposited by VHF-(blue circles) and by RF-PECVD (red triangles), and (*p*)a-Si:H by RF-PECVD (green diamonds). (a) Coplanar dark conductivity, (b) UV Raman crystallinity I_c/I_a, (c) V_{oc}, and (d) FF of SHJ solar cells. The arrows indicate the thickness at which each parameter is saturated. Note that t_p of textured Si cells represents the nominal thickness of the hole contact layer.

© 2021年 応用物理学会