

【新エネルギー(太陽エネ)】 結晶シリコン アモルファスシリコン ヘテロ接合  
高効率太陽電池

仮訳

## a-Si/c-Siヘテロ接合PVセル(スイス) 高効率な結晶・アモルファスシリコンヘテロ接合 PV セル

グループメンバー:	S. De Wolf, N. Badel, L. Barraud, B. Demareux, A. Descoedres, J. Geissbuehler, Z. Holman, S. Morel, J. Seif, A. Tomasi
外部メンバー	Miha Filipic (University of Ljubljana, Slovenia)
修士学生	Charly Berthod (INPG, Phelma, Grenoble, France), El Mahdi El Mhamdi (EPFL)
実施中のプロジェクト:	CTI, Axponaturstromfonds, FP7-20 plus, direct industrial mandates

### 研究開発の背景

シリコンヘテロ接合技術(Si-HJT)は、20%超のエネルギー変換効率を有する太陽電池を商業生産レベルにおいても可能とするため、結晶シリコン PV セルにおいて注目されている話題である。ヘテロ接合 PV セルは、単結晶シリコンウェハーと、その上のアモルファスシリコンの薄膜層から成る。この構造の主要な点は、広いバンドギャップを持つフィルム(膜)の挿入により、著しく再結合がアクティブ(ohmic: 抵抗)接点を結晶表面から外すことである。デバイスの性能をフルに発揮するためには、ヘテロ接合状態の密度が最低限となる必要がある。実際には、数ナノメートルの薄さの水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)フィルムがその有力な候補である。このフィルムのバンドギャップは c-Si のそれよりも広く、イントリンシック (真性) の状態である場合、このフィルムは水素化によって c-Si の表面状態の密度を低減することができる。しかも、このフィルムは、n 型か p 型のいずれかへのドーピングが比較的容易であり、記録的に低い飽和電流密度の値で接点の(リソグラフィを用いない)作成を可能とする。この種のデバイスでは、日本企業であるサンヨー(現在パナソニック)による、大面積 PV セルの(>100cm<sup>2</sup>)エネルギー変換効率(~23%)が報告されている。

図 1 にヘテロ接合 PV セルを示す。図 2 にはバンドの概要図を示す。基本的なデバイスでは、前面(照射面)に、どちらも PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition: プラズマ強化化学蒸着)処理された、真性な a-Si:H パッシベーション層と p 型のアモルファスシリコンエミッターを備えている。シリコン層の上には、反射防止用の透明伝導酸化物

(transparent conductive oxide: TCO)が、PVD(physical vapor deposition: 物理蒸着)処理され、スクリーン印刷した金属接点グリッドで電荷を収集する。背面には、どちらもPECVD 処理された真性な a-Si:H(水素化アモルファスシリコン)のパッシベーション層と n 型アモルファスシリコンでできた裏面電界(back-surface field: BSF)層、TCO 層と金属接点層が積み重ねられている。

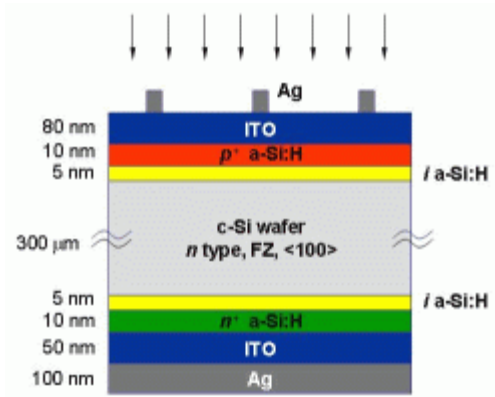


図 1  
ヘテロ接合 PV セルの断面図(原寸大ではない)

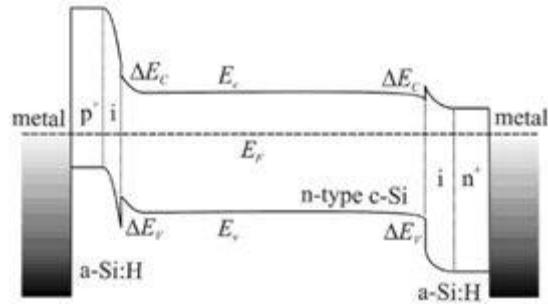


図 2  
ヘテロ接合 PV セルの電子バンド(原寸大ではない)

このデバイスに関する研究チームの研究活動の主要な分野は以下の通り：

- ◆ 実験室用セルの最適化 例：パッシベーションイントリンシックバッファ層、イントリンシック層とドープ層の接合面、シリコンと ITO の接合面、および低温度ファインラインメタライゼーション
- ◆ バンドのラインナップおよび各材料と接合面の特性を含むデバイス物理の基礎的理解
- ◆ プラズマとフィルム特性の相関関係の基礎的理解

過去数年間において、エネルギー変換効率の向上、デバイスのより深い理解、より優れたプロセス管理などの重要な進展がみられた。これらの結果はすべて、招待講演を含むいくつかの科学誌や国際会議において発表されている。

### 研究の主要な部分

我々の研究では、使用した材料の理解と太陽電池開発の理解において釣り合いがとれている。ここでは、キーとなる発見のいくつかについて簡潔に再考する。

### **a-Si:H と c-Si 接合面が原子で明確に分かれる必要性**

高効率の太陽電池には、表面のパッシベーションが極めて重要である。a-Si:H のフィルムはこの点において大きな関心を集め、最適な誘電体フィルムと同等であるとされている。イントリンシックなフィルムにおいては、優れたパッシベーションに必要な条件として接合面が原子で明確に平面[2]およびテクスチャを有する基板で分かれることである[4]。

### **新たな界面再結合モデル**

通常、欠陥を通じたキャリア再結合は、ショックレー・リード・ホール (Shockley-Read-Hall: SRH) の 2 電荷状態レベルを介して起こると考えられている。しかし、界面再結合の原因となる欠陥状態は、シリコンのダングリングボンド(未結合手)である可能性がより高い。フェルミ準位のポジションによれば、この欠陥は平衡状態において中立、正電荷、負電荷の状態にあり、それぞれ 1 個、0 個および 2 個の電子を受け入れる。このような両性的挙動(および閉形式の再結合速度を可能とさせるある程度の単純化の導入)を踏まえ、新たな界面再結合モデルが導入され、実験的に a-Si:H/c-Si 構造[1]が実証された。

### **真性 a-Si:H/c-Si 接合面パッシベーションの特性**

蒸着後のアニーリング処理は、物理的な見識を得るために活用できる、調査中のサンプルの電子・材料特性を変化させる単一パラメーターを提供してくれる。これは、低温度下において、このような接合面の電子界面パッシベーションの品質にとって極めて有益であることがわかった。等温アニーリング中の界面パッシベーションの変化の詳細から、a-Si:H フィルム(接合面に近い)における高い水素化状態から、モノヒドライド (monohydride)c-Si 表面状態[2]への水素の移動によりパッシベーションが発生すると考えられる。結論として、a-Si:H(i)/c-Si 界面パッシベーションは、電界効果[2]よりむしろ化学的表面状態パッシベーションに起因する必要がある。

### **ドーブ a-Si:H / c-Si 界面再結合の性質**

ヘテロ接合デバイスを作るには、エミッターまたは裏面電界形成のためのいずれかに、ドーブ膜が必要である。しかし、そのようなフィルムは界面で電界効果をもたらす可能性があるが、そのパッシベーションの電気的特性は多くの場合、真性のパッシベーション層よりも劣ることがわかっている。この現象はドーブ膜のバンドギャップ内のフェルミ準位に起因し、半導体内の生来の補償欠陥の生成に影響を与え、ドーピングの影響を和らげる。その結果、通常 p 型フィルムの方が、n 型フィルムに比べてパッシベーションがうまくいかない理由について、基本的な説明が明確に説明された[3]。

### **a-Si:H / c-Si 界面パッシベーションの品質を示すシラン欠乏比率**

シリコンヘテロ接合 PV セルには、結晶シリコンウェハー表面のパッシベーションと、エミッターと裏面電界はすべて、真性な部分とドーパした部分から成るアモルファスシリコンの薄い層によって作られ、PECVD 処理が施されている。PECVD 処理された材料の特性は、プラズマの特性に直接関係しているため、プラズマ診断法は、そのようなデバイスを最適化する上で非常に実用的なツールである。新しい診断法は、蒸着処理時の、プラズマ中のシラン分子欠乏比率(molecular silane depletion fraction)を「現地測定」するために開発された。

シラン欠乏がそのプロセスパラメーターに強く依存していることが認められ、パッシベート処理中のアモルファスシリコン層の品質に係る要因であることがわかっている。優れたパッシベーションは、実際には、シランが非常に欠乏したプラズマ、すなわちアモルファス(非晶質)から微結晶への転移に近い状態で得られる[5]。

### **a-Si:H/c-Si 界面の光誘起劣化**

ダングリングボンドを作ったことで、a-Si:H でパッシベートされた結晶シリコン(c-Si)表面の光誘起劣化が a-Si:H/c-Si 構造内に生じる。最初のパッシベーションは、研磨した c-Si(100)上で、通常バルク型 a-Si:H LID に伴って生じるパッシベーションよりも遥かに早いタイムスケールで劣化する。この現象は、a-Si:H/c-Si(111)界面には見られない。これらの違いは、各層の表面上に認められた再構成に起因している。これは、いわゆる「早い」状態の出現と、バルク型 a-Si:H における(内部)表面再構成間のリンクを指し示しているのかもしれない[7]。

### **水素プラズマ処理で改良したアモルファス/結晶シリコン界面のパッシベーション**

シリコンヘテロ接合 PV セルは、PECVD 処理された薄い真性の a-Si:H 層によるウェハー表面の優れたパッシベーションにより、高い開放電圧を有している。水素プラズマ処理がフィルム蒸着中に用いられる場合、パッシベーションの劇的な向上が見られる。a-Si:H 層のバルクは、水素プラズマ処理後に僅かに原子配列の乱れが増し、ウェハー/フィルムの界面の水素化は、a-Si:H 層は蒸着したままで、やはり改良されていない。水素プラズマ処理を採用し、産業用に互換性のあるプロセスでヘテロ接合 PV セル(4cm<sup>2</sup>)が作られ、開放電圧が最大 725mV、受光面積の変換効率が最大 21%(図 4 参照)という値が得られた[8]。

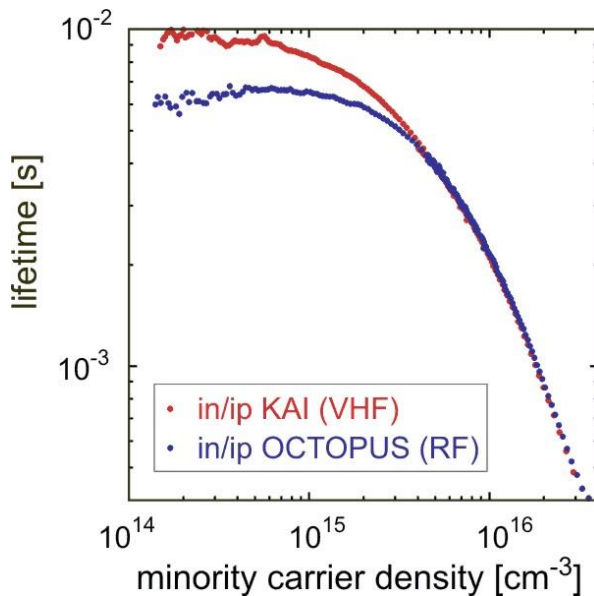


図 3

VHF(very high frequency)プラズマとRF(radio frequency)プラズマの PECVD(プラズマ強化化学蒸着)処理により作られた、PV セルの先駆体(15nm の in 接合と ip 接合の a-Si:H スタック層にパッシベート処理で、テクスチャ化された c-Si 基板)の少数キャリアのライフタイム曲線

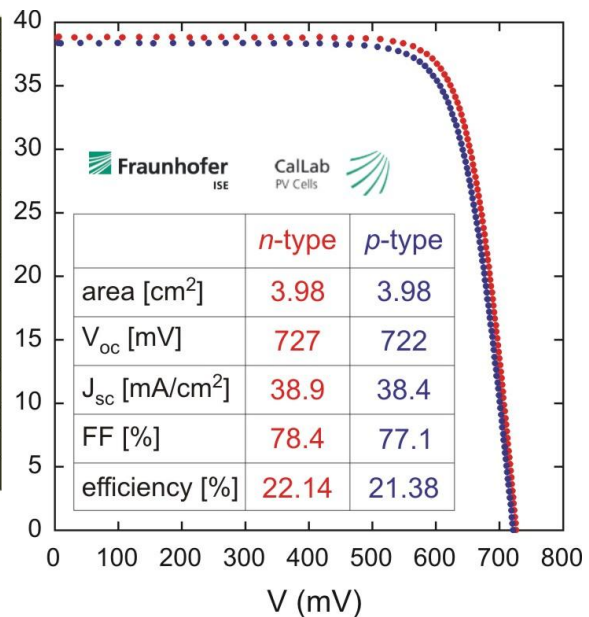


図 4

EPFL(Ecole Polytechnique Fedeerale de Lausanne)大学の大量積 VHF プラズマリアクターを用いて n 型と p 型の基板で得られた最高レベルの Si-HJT PV セル(2x2cm<sup>2</sup>)の IV 曲線[12]

### n 型/p 型ウェハー上の変換効率 21%超の高効率シリコンヘテロ接合 PV セル

n 型/p 型ウェハー上の前面/裏面エミッターのシリコンヘテロ接合 PV セルの特性や、高効率な変換効率を得られるポテンシャルについて、試験的に研究された。低キャリア注入領域では、界面欠陥捕獲断面図にひずみが主な要因となり、p 型ウェハー上の PV セルは、少数キャリアのライフタイムによる損害を受ける。これにより、n 型セルの場合よりも、曲線因子(FF)が僅かに低くなる。しかしながら、高品質のパッシベーション層を用いることによって、これらのロスが最小限に抑えることができるのである。フロートゾーン(FZ)ウェハーの p 型 n 型両タイプで、高い開放電圧(Voc)が得られ、その値はそれぞれ、n 型で 735mV、p 型で 726mV であった。チョクラルスキー(Czochralski: CZ)法の p 型ウェハーで測定した最高 Voc 値が僅か 692mV であったのに対し、CZ 法の n 型ウェハーでは 732mV にまで達した。ヘテロ接合で高品質の p 型/n 型ウェハー上とほぼ同等レベルの性能を示すことができるとした場合、PV セル(4cm<sup>2</sup>)で得られる、公認の受光面積変換効率の最高値はそれぞれ、FZ ウェハーの n 型で 22.14%( Voc = 727 mV, FF = 78.4%)、p 型で 21.38% (Voc = 722 mV, FF = 77.1%)であった。これらの値は我々の知る限り、p 型ウェハー上のシリコンヘテロ接合 PV セルについてこれまでに報告された中で最も高い変換効率であり、適切な曲線因子(FF)を持つ p 型結晶シリコンデバイスで最も高い Voc(開放端電圧)である[12]。

## 今後の展望

今後数年内に同グループは、前述のさまざまなトピックの詳細について研究を行う予定である。

- ◆ ドープ層と TCO フィルム間の界面の最適化
- ◆ 界面で観測されたさまざまな効果について理解を深める
- ◆ 界面で観測されたさまざまな効果について理解を深める
- ◆ 短絡電流の高い値を維持するための、より薄い基板の加工とライトトラップ構造の開発。
- ◆ TCO フィルムと a-Si:H フィルムにおける寄生吸収(parasitic absorption)の低減
- ◆ a-Si:H/c-Si 界面について理解を深める
- ◆ 工業規格に合わせたデバイスサイズの拡大

## 参考文献

- [12] A. Descoedres, Z. Holman, L. Barraud, S. Morel, S. De Wolf and C. Ballif, >21% Efficient Silicon Heterojunction Solar Cells on n- and p-Type Wafers Compared, IEEE J. Photovoltaics (in press, doi:10.1109/JPHOTOV.2012.2209407), 2013
- [11] S. De Wolf , A. Descoedres, Z. C. Holman, C. Ballif, High-efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells: A Review, Green, DOI: 10.1515/green-2011-0039, 2012
- [10] S. De Wolf, C. Ballif, and M. Kondo, Kinetics of a-Si:H bulk defect and a-Si:H/c-Si interface-state reduction, Phys. Rev. B 85, 113302, 2012
- [9] Z. C. Holman, A. Descoedres, L. Barraud, F. Z. Fernandez and J. P. Seif et al. Current Losses at the Front of Silicon Heterojunction Solar Cells, IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 2, num. 1, p. 7-15, 2012
- [8] A. Descoedres, L. Barraud, Stefaan De Wolf, B. Strahm, D. Lachenal, C. Guérin, Z. C. Holman, F. Zicarelli, B. Demaux, J. Seif, J. Holovsky, C. Ballif, Improved amorphous/crystalline silicon interface passivation by hydrogen plasma treatment, Applied Physics Letters, Vol. 99, No. 12. (2011), 123506. doi:10.1063/1.3641899
- [7] S. De Wolf, B. Demaux, A. Descoedres, and C. Ballif, Very fast light-induced degradation of a-Si:H/c-Si(100) interfaces, Phys. Rev. B 83, 233301, 2011
- [6] S. De Wolf, Y. Andraut, L. Barraud, R. Bartlome, D. Bätzner, P. Bôle, G. Choong, B. Demaux, A. Descoedres, C. Guérin, N. Holm, M. Kobas, D. Lachenal, B. Mendes, B. Strahm, M. Tesfai, G. Wahli, F. Wuensch, F. Zicarelli, A. Buechel and C. Ballif, High-efficiency silicon heterojunction solar cells: From physics to production lines, Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 2010 10th IEEE International Conference, Shanghai, November 2010, pp. 1986 - 1989 , 10.1109/ICSICT.2010.5667849
- [5] A. Descoedres, L. Barraud, R. Bartlome, G. Choong, Stefaan De Wolf, F. Zicarelli, and C. Ballif , The silane depletion fraction as an indicator for the

amorphous/crystalline silicon interface passivation quality, Appl. Phys. Lett., Vol 97, pp. 183505-, November, 2010

[4] S. Olibet, E. Vallat-Sauvain, L. Fesquet, C. Monachon, A. Hessler-Wyser, J. Damon-Lacoste, S. De Wolf, and C. Ballif, Properties of interfaces in amorphous/crystalline silicon heterojunctions, Phys. Stat. Sol. A 207, 651, 2010

[3] S. De Wolf and M. Kondo, Nature of doped a-Si:H/c-Si interface recombination, J. Appl. Phys. 105, 103707, 2009

[2] S. De Wolf, S. Olibet, and C. Ballif, Stretched-exponential a-Si:H/ c-Si interface recombination decay, Appl. Phys. Lett. 93, 032101, 2008

[1] S. Olibet, E. Vallat-Sauvain, and C. Ballif, Model for a-Si:H/c-Si interface recombination based on the amphoteric nature of silicon dangling bonds, Phys. Rev. B 76, 035326, 2007

翻訳：NEDO（担当 総務企画部 松田 典子／原田 玲子）

出典：本資料は、École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)、Photovoltaics and Thin Film Electronics Laboratory (PV-LAB)の以下の記事を翻訳したものである。

a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells

High-efficiency crystalline / amorphous silicon heterojunction solar cells

[http://pvlab.epfl.ch/heterojunction\\_solar\\_cells](http://pvlab.epfl.ch/heterojunction_solar_cells)

(Used with Permission of École Polytechnique Fédérale de Lausanne)