



Tokyo Tech

Press Release

2024年3月14日

東京工業大学

高性能シリコン太陽電池製造手法の安全化を実現

ーキャリア再結合抑制効果の高い薄膜を形成する新手法を提案ー

【要点】

- 結晶シリコン表面に SiH_4 ガスを用いずキャリア再結合抑制層を形成する手法を確立
- 対向ターゲットスパッタの使用により高速製膜と製膜時ダメージ低減を両立
- シリコンヘテロ接合太陽電池の低コスト化に向けた新しい製膜技術

【概要】

東京工業大学 工学院 電気電子系の宮島晋介准教授と李莎莎(リ・ササ) 大学院生は、シリコンヘテロ接合 (SHJ) 太陽電池 (用語 1) 用の水素化アモルファスシリコン (a-Si:H) (用語 2) を、強い爆発性を有する SiH_4 ガス (用語 3) を使用せずに、高速かつ低ダメージで形成する手法を確立した。

次世代の太陽電池としての期待されている SHJ 太陽電池は、理論効率である 29% に迫る 26.8% の効率を示すなど高い性能が報告されているが、既存の PERC 型に比べ製造コストが高いことが課題とされている。SHJ 太陽電池の高効率化には、シリコンウェハ表面に高品質な a-Si:H 層を形成することにより、ウェハ表面でのキャリア再結合 (用語 4) を抑制することが重要であるが、既存手法では爆発性・毒性を持つ SiH_4 ガスを用いる必要があり、コスト増の一因となっている。そこで本研究では、対向ターゲットスパッタ (FTS) (用語 5) を用いることにより、 SiH_4 ガスを使用せずに、高速かつ低ダメージで a-Si:H 層を形成できることを実証した。今後、大面積製膜の実証が進めば、SHJ 太陽電池やペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池の低コストプロセスの実現が期待できる。

研究成果は 2 月 20 日に「*Solar RRL*」にオンライン掲載された。

●背景

現在の太陽光発電においては結晶シリコン太陽電池が主流であり、主に PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) 型と呼ばれる構造が使用されている。さらに、次世代の構造として期待されているものとして、シリコンヘテロ接合 (SHJ) 構造が挙げられる。この構造においては変換効率 26.8%が報告されており、理論効率である 29%に迫りつつあるが、PERC 型に比べ製造コストが高いことが課題とされている。SHJ 太陽電池の高い効率は、a-Si:H をシリコンウェハ表面のパッシベーション層 (ウェハ表面でのキャリア再結合を抑制する層) として用いることに起因しているが、その一方、爆発性・毒性ガスを使用する a-Si:H 層の形成プロセス (プラズマ CVD 法、Cat-CVD 法) がコスト増加の要因のひとつとなっている。そこで、十分なキャリア再結合抑制効果を有した a-Si:H 膜を、強い爆発性や毒性を有するガスを使用せずに、実用的な製膜速度で形成する手法の開発が望まれている。

●研究成果

本研究では、対向ターゲットスパッタ (FTS) 法と呼ばれる手法を用いることにより (図 1 左)、十分なキャリア再結合抑制効果を有した a-Si:H 膜を、強い爆発性・毒性を有するガスを使用せずに、実用的な製膜速度でシリコンウェハ上に形成することに成功した。ドーピング (用語 6) 量の少ないシリコンのスパッタには RF 電源を用いた RF スパッタが一般的に用いられるが、DC 電源を用いた DC スパッタを用いたことにより本成果が実現された。なお、DC 電源の使用により装置構成が簡略化されるという利点も存在する。シリコンヘテロ接合 (SHJ) 太陽電池は図 1 右に示す構造を有しており、シリコンウェハ表面のキャリア再結合はウェハ直上に存在する i-a-Si:H (アンドープ a-Si:H) によって抑制される。そこで、シリコンウェハの両面に i-a-Si:H のみを形成した試料を用いてウェハ表面でのキャリア再結合抑制効果を評価した。なお、a-Si:H 膜形成後に窒素中で 200°C の熱処理を行っている。

図 2 にウェハ表面でのキャリア再結合抑制効果の指標となる実効キャリアライフタイムを示している。厚さ 42 nm の i-a-Si:H を用いた場合、実効ライフタイムは 10 ms を超える値を示した。また、太陽電池を形成した場合の出力電圧の目安である iV_{oc} の値は 726 mV と高い値を示した。実際の太陽電池で用いる 5 nm の i-a-Si:H を用いた場合でも iV_{oc} は 717 mV と高い値を保つことが明らかとなった。さらに、将来的に重要となるであろう薄型シリコンウェハ (100 ミクロン) に 5 nm の i-a-Si:H を形成した試料においては iV_{oc} は 730 mV であった。これらの実効ライフタイムや iV_{oc} の値は従来技術であるプラズマ CVD 法や Cat-CVD 法と比べても遜色のない値である。また、一般的なスパッタ法において、製膜速度 1.8 nm/min 以上ではプラズマダメージにより良好なキャリア再結合抑制効果が得られていなかったが、本研究においては 31 nm/min という高速で製膜してもキャリア再結合抑制効果が損なわれないことを見出した。

FTS装置の概略図

SHJ太陽電池の概略図

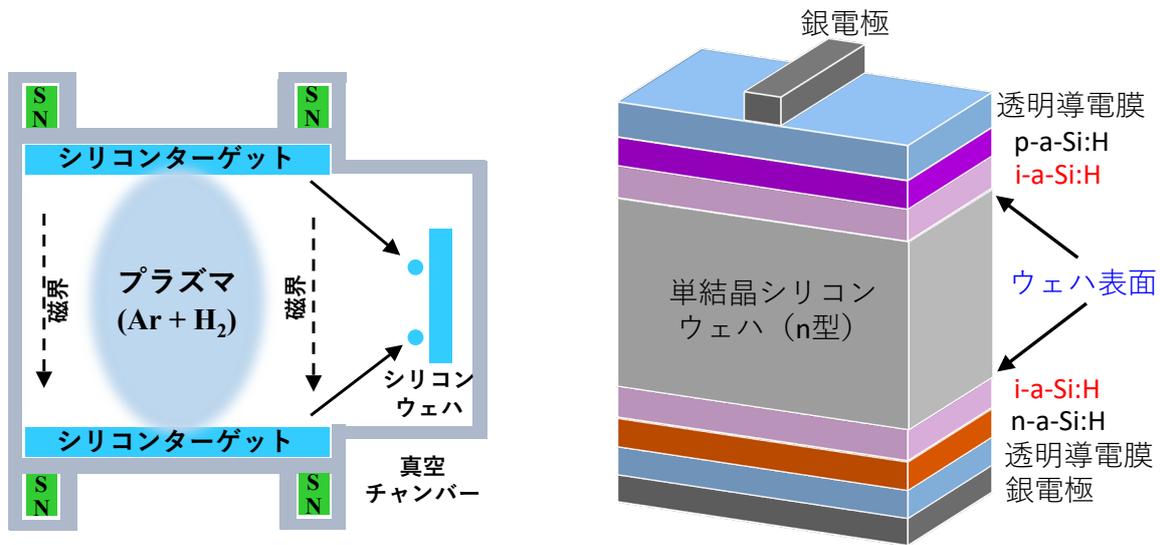


図1 対向ターゲットスパッタ装置とシリコンヘテロ接合太陽電池の概略図

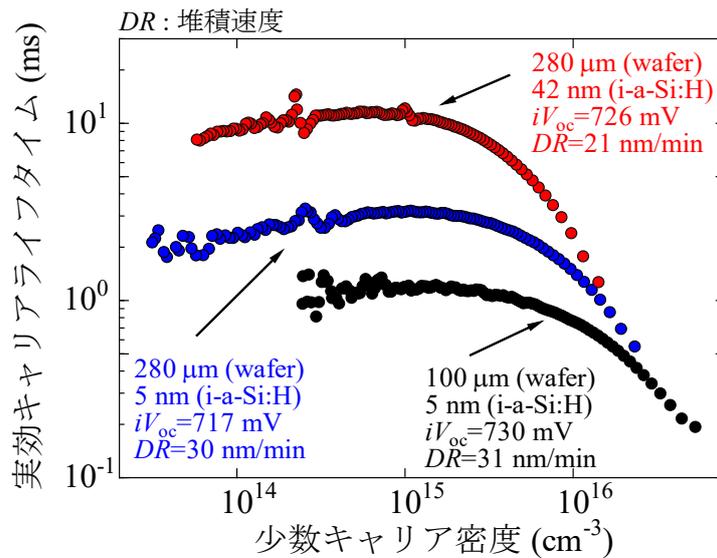


図2 i-a-Si:Hを両面に堆積したシリコンウェハの実効キャリアライフタイム

●社会的インパクト

本研究では、強い爆発性・毒性を持った SiH_4 ガスを使用しない新規手法により、十分なキャリア再結合抑制効果を有する a-Si:H を実用的な堆積速度で形成できることを初めて示した。これにより SiH_4 ガスを使用する従来技術（プラズマ CVD 法、Cat-CVD 法）以外の選択肢が初めて生まれたことになる。さらなる大面積製膜の検証を行い、SHJ 太陽電池の SiH_4 フリー形成技術が実現されれば、SHJ 太陽電池の低コスト化につながるものと期待できる。また、また、将来の低コスト・超高効率太陽電池として期待されるペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池には SHJ 太陽電池が使用されるため、タンデム太陽電池への展開も期待される。

●今後の展開

本研究の成果を基に、さらなる高速製膜、ドーピング、大面積製膜の可能性を追求することにより、SHJ 太陽電池の SiH_4 フリー形成技術の実現が期待できる。また、a-Si:H には太陽電池だけではなく、さまざまな応用先が存在するが、 SiH_4 ガスの取り扱いの難しさから、大学などでは気軽に取り扱いえる材料ではない。本手法は a-Si:H を低ダメージで手軽に製膜できる技術であり、太陽電池以外の分野にも応用の可能性も検討していきたいと考えている。

●付記

本研究は、東工大基金による「東工大の星」支援【STAR】および JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2106 の支援を受けた。

【用語説明】

- (1) **シリコンヘテロ接合 (SHJ) 太陽電池**：太陽電池の基本構造は p 型半導体と n 型半導体が接合された pn 接合である。従来型のシリコン太陽電池ではシリコンウェハ中にドーパント（ホウ素、リン）を拡散させることにより、p 型領域と n 型領域を形成する。それに対し、SHJ 太陽電池ではシリコンウェハ上に p 型、n 型水素化 a-Si:H (用語 2) を形成することにより pn 接合を形成する。高効率な SHJ 太陽電池では、シリコンウェハと p 型もしくは n 型 a-Si:H の間に 5 nm 程度のドーパントをほとんど導入しないアンドープ a-Si:H (i-a-Si:H) を挿入することで、シリコンウェハ表面でのキャリア再結合を抑制している。200°C 程度の比較的低温プロセスで形成できることが特徴である。三洋電機株式会社（現パナソニックホールディングス株式会社）が実用化した HIT 太陽電池は SHJ 太陽電池である。
- (2) **水素化アモルファスシリコン (a-Si:H)**：シリコンからなる非晶質半導体であり、膜中の欠陥の末端の為に水素を含んだもの (10 - 30 at%)。ディスプレイ用の薄膜トランジスタ (TFT) に使用されるほか、電卓や腕時計などの小型機器の太陽電池（アモルファスシリコン太陽電池）として使用されている。通常の半導体と同様に p 型、n 型の作り分けが可能であり、ホウ素添加により p 型膜、リン添加により n 型膜が形成可能である。
- (3) **SiH_4 ガス**：シランガス、モノシランガスなどと呼ばれるガスである。半導体や太陽電池などの製造プロセスにおいて、シリコン系膜（単結晶シリコン、多結晶シリコン、シリコン酸化膜、シリコン窒化膜など）形成のためのシリコン原料ガスとして使用される。爆発性が非常に強く（自然発火性あり）、毒性も有しており、7 種類の特殊高圧ガスのひとつに指定されている。使用に際しては、管轄の都道府県への届出が必要である。また、各種除害設備や漏洩監視設備などの設置が必要である。
- (4) **キャリア再結合**：半導体中の電子や正孔をキャリア（電荷を運ぶ電流の担い手）

と呼ぶ。太陽電池においては、光吸収層となる半導体中で光を吸収すると、電子・正孔対が生成される。電子、正孔が各々別々の電極に到達することで光起電力が生まれる（この状態で電極同士を接続すると光電流が流れる）。半導体中では生成した電子と正孔が結びつき、電子・正孔対が消滅する現象が存在し、これをキャリア再結合と呼ぶ。キャリア再結合は、半導体中の欠陥の多い部分（特に表面や材料同士の界面）で生じやすい。再結合が生じると各々の電極に分離できる電子と正孔の数が少なくなり太陽電池の出力が小さくなるため、これをできるだけ抑制することが高効率太陽電池の実現には重要である。

- (5) **対向ターゲットスパッタ (FTS)**：薄膜形成プロセスのひとつであるスパッタ法の1種。通常のスパッタ法では真空容器を減圧の後、Ar ガスを導入し、形成する材料を板状にしたもの（ターゲット）に負の電圧を印加する。十分な負電圧を印加すると放電が開始され、Ar プラズマがターゲット近傍に形成される。プラズマ中のイオン化したAr がターゲットに衝突すると、ターゲットに含まれる原子がはじき出され、ターゲットに対向しておかれた基板上に膜が形成される。この場合にはターゲットと基板が対向しているため、基板がプラズマにさらされることによるプラズマダメージや、ターゲットから反射されたAr が基板に飛び込む（反跳Ar）などにより基板表面がダメージを受ける。それに対し、対向ターゲットスパッタ法では2枚のターゲットが対向しており、プラズマがターゲット間に閉じ込められるため、ダメージを抑制することが可能である。なお、対向ターゲットスパッタ法は40年ほど前に東工大の直江、星らによって主に磁性体のスパッタ向けに開発された手法である。（*IEEE transactions on Magnetics*, MAG-16, 646 (1980)）
- (6) **ドーピング**：太陽電池を含む半導体デバイスの形成には2種類の半導体（p型、n型）を作り分ける必要がある。IV族元素であるシリコンは、III族元素であるホウ素を微量添加することによりp型に、V族元素であるリンを微量添加することによりn型を形成可能である。この母材となる半導体材料（ここではシリコン）に対して不純物を微量添加することをドーピングと呼ぶ。意図的にドーピングを行わずに作製した薄膜をアンドープ膜と呼ぶ。

【論文情報】

掲載誌：*Solar RRL*

論文タイトル：Demonstration of Excellent Crystalline Silicon Surface Passivation ($S < 1.27$ cm/s) by High-Rate DC-Sputtered Hydrogenated Amorphous Silicon

著者：Shasha Li, Shinsuke Miyajima

公開日：2024年2月20日（オンライン、現地時間）

DOI：10.1002/solr.202400045

【問い合わせ先】

東京工業大学 工学院 電気電子系 准教授

宮島晋介

Email: miyajima.s.aa@m.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2807

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報課

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661