

太陽光励起レーザーと組み合わせるためのシリコン光電変換素子(VI)

Silicon photovoltaic cells coupled with solar-pumped lasers (VI)

豊田中研¹, 名大² ○竹田 康彦¹, 伊藤 忠¹, 山田 登¹, 飯塚 英男¹, 伊藤 博², 元廣 友美²

Toyota Central R&D Labs.¹, Nagoya Univ.²

○Y. Takeda¹, T. Ito¹, N. Yamada¹, H. Iizuka¹, H. Ito², and T. Motohiro²

E-mail: takeda@mosk.tytlabs.co.jp

太陽光をレーザー光(波長 1.064 μm)に変換し[1]、これをシリコン光電変換素子に照射する、新規太陽光発電システムを提案、開発している(図 1)[2]。レーザー光の特徴を活かして、無線あるいは光ファイバーを介した遠方へのエネルギー伝送も可能である。この場合、太陽光の直接照射に比べて素子への入射光が格段に強いので、内部抵抗と Auger 再結合の影響によりそれぞれ形状因子、短絡電流が低下することが懸念される。ウェハを薄くするとこれらの影響は低減されるが、光吸収が不十分となるので光閉じ込めが必須である。

セルの入射面に反射防止コート(ARC)を、裏面に拡散反射鏡を設けると、裏面で反射された光のうち全反射臨界角よりも大きい入射角度で入射面に達した光は再び内部に反射されて閉じ込められるので、実効的な光路長がセル厚さの $4n^2$ 倍(n は屈折率)になる[3]。レーザー光が垂直または限られた範囲から入射する場合(入射角 ϕ の上限 ϕ_0)は、ARC に替えて角度選択フィルター(Angle-selective filter, ASF)を用いると、斜入射光が反射されるので閉じ込めはより強くなる[4]。

$\phi \equiv 0^\circ$ に限定される場合には、バンドパスフィルター(BPF)が $\phi \equiv 0^\circ$ のみの入射光を透過する ASF として機能する。ただし、実用的には $\phi_0 = 5\text{--}10^\circ$ の許容範囲が求められる。ASF の透過角度範囲を広げるのは BPF の透過波長範囲を広げることと等価であるので、広帯域 BPF の 2 重共振器構造(double cavity, 2C-)を用いれば、 $\phi_0 = 5\text{--}10^\circ$ の ASF の機能が得られる。光ファイバーを介してレーザー光が照射される場合にも、2C-BPF を用いることができる。ただし、 $\phi \leq \phi_0$ では 1 に近く、逆に $\phi_0 < \phi \leq 90^\circ$ の広い角度範囲で低い透過率を維持するための最適化が必要である。飛行中のドローンや走行中の電気自動車など移動体への無線給電の場合は、 ϕ_0 が更に大きくなる。この場合は、ショートパスフィルター(SPF)が ASF として用いられる。 ϕ が大きい場合、通常の SPF を用いると透過/反射領域の閾値が偏光に依存するので、これを解消することが重要である。

各 ϕ_0 に適した $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 多層膜 ASF を用いた厚さ 50 μm のシリコン光電変換素子の光吸収率が最大となるように ASF の構造を最適化した結果を図 3 に示す。 $\phi_0 \geq 45^\circ$ までは ARC に比べての ASF の優位性が保たれる。 $\phi_0 = 45^\circ$ の場合の透過率の ϕ 依存性に僅かに肩が見られる程度にまで透過/反射閾値の偏光依存性が抑制されている。 $\phi = 70^\circ$ 付近に「漏れ」が生じる場合があるものの、その範囲が狭いため悪影響は僅かである。

この光閉じ込め効果を取り入れ、PC-1D を用いて、光電変換素子の変換効率を計算した。1 sun 照射に比べて表面再結合の影響が小さくなるものの、接触抵抗低減がより重要となる。ヘテロ接合、TOPCon などの技術を最適化して用いれば、100 W/cm^2 のレーザー照射時に 50% 前後の高い変換効率を得られることがわかった。

これらの設計に基づいて、入射面に BPF、裏面に酸/アルカリエッチング+Ag 拡散反射鏡、更に $p^+\text{-Si}/\text{Al}(1.8\text{ nm})/\text{Ag}$ 高反射率オーミック電極を用いた、厚さ 50 μm 、開口径 100 μm のシリコン光電変換素子を作製した。20 W/cm^2 までの高強度レーザー照射下で高い外部量子効率(最大 0.92)が得られることを実証した。

本研究の一部は、JST 戦略的創造研究推進事業—先端的低炭素化技術開発(ALCA)の助成を受けた。

[1] S. Mizuno, et al., Opt. Express **20**, 5891(2012); K. Hasegawa, et al., Opt. Express **23**, A519 (2015). [2] T. Motohiro, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 08MA07 (2017). [3] E. Yablonovitch, J. Opt. Soc. Am. **72**, 899 (1982). [4] Y. Takeda, et al., J. Appl. Phys. **116**, 014501 (2014); Y. Takeda, et al., Appl. Opt. **56**, 5761 (2017).

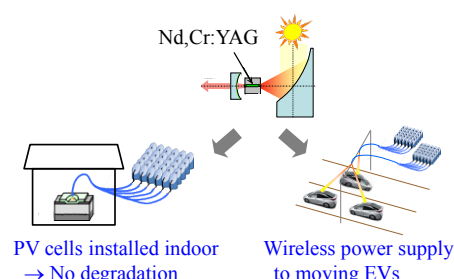


Fig. 1 Power transmission from solar-pumped lasers.

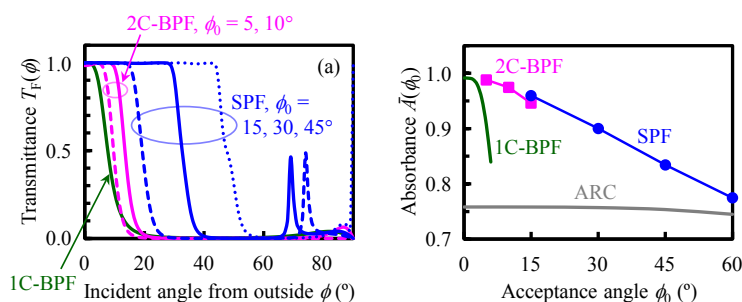


Fig. 2 (a) Transmittance of angle-selective filters. (b) Absorbance of the 50- μm -thick silicon photovoltaic cells.