

Survey of Trend and Applicability of Photovoltaic Receivers for Laser Beamed Power in L-SSPS*

Yuka Saito (CSP Japan, Inc.)

Hiroaki Suzuki, Hiroyuki Yoshida, Katsuhito Kisara (JAXA)

Kazuhisa Fujita (The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries)

Abstract

In designing L-SSPS, conversion efficiency and cost of the photovoltaic receivers for laser beamed power are critical factors. In L-SSPS, it is assumed that laser beam at a wavelength of $1.06\mu\text{m}$ would be transmitted from space to earth. Although it has been considered that if the solar cells which have the band gap suited to the wavelength of $1.06\ \mu\ \text{m}$ is used, converting the laser energy to the electricity with high efficiency would be theoretically possible, specific solar cells and conversion efficiency suited to the wavelength of $1.06\ \mu\ \text{m}$ was not examined so far.

In this paper, trend and applicability of Si, InGaAs and CIS are investigated as major candidate photovoltaic receivers. And conversion efficiency from $1.06\ \mu\ \text{m}$ laser light to electricity of those photovoltaic receivers is also estimated.

* Presented at the Thirteenth SPS Symposium, 28-29 October, 2010

L-SSPS におけるレーザー受光素子の動向・適用可能性*

齊藤由佳（シー・エス・ピー・ジャパン株式会社）

鈴木拓明 吉田裕之 木皿且人（宇宙航空研究開発機構）

藤田和久（光産業創成大学院大学）

1. はじめに

L-SSPS では、宇宙から地上に伝送されるレーザーの波長として $1.06\ \mu\text{m}$ が想定されているが、地上でのレーザー受光素子の光電変換効率、コスト等はシステム全体の成立性を左右する重要な要素の一つである。本論文では、まず L-SSPS において有力候補となり得るレーザー受光素子の調査を行い、素子特性、環境性、耐久性、コスト、開発動向、課題等について整理を行う。また、その中で適用可能性が高いと考えられる Si（近赤外増感型）、InGaAs、CIS のセルに注目して、波長 $1.06\ \mu\text{m}$ レーザー照射時の光電変換効率を計算する。

2. 候補となる受光素子の選定

光のエネルギー E は光の波長 λ に反比例し、 $E\ (\text{eV}) = 1240 / \lambda\ (\text{nm})$ から求められる。 $1.064\ \mu\text{m}$ のレーザー光のエネルギーは $1.1654\ (\text{eV})$ となる。一方、受光素子である半導体のバンドギャップ $E_g\ (\text{eV})$ の大きさは半導体の結晶材料固有のものであるが、変換効率がピークとなる単一光の波長は吸収端より $0.2\sim 0.3\text{eV}$ 程度高いところ（短波長側）にあるので、 $1.1654\ (\text{eV})$ でピーク応答する受光素子は 0.9eV 程度のバンドギャップを持つ半導体である。さらに半導体が直接遷移型であるか間接遷移型であるかも重要な要素として捉える必要がある。Si や Ge に代表される間接遷移型の半導体は光吸収係数が小さく、十分に光を吸収するには $100\ \mu\text{m}$ 以上の厚さが必要となるが、化合物半導体の多くは直接遷移型の半導体であり、光吸収係数が大きいため、数 μm 程度の厚さがあれば十分高い効率が期待できるという長所がある。上記の事項を考慮すると、 $1.064\ \mu\text{m}$ のレーザー光を高効率で電気エネルギーに変換する素子は、理論的には $0.9\ \text{eV}$ 程度のバンドギャップを持つ直接遷移型の半導体が最も適しているといえる。具体的には Si、InGaAs、CI(G)S 等が候補セルとなる。

3. 候補素子の特徴

文献調査および専門家へのヒアリング調査から、候補素子の適用可能性を調査した。以下に調査結果を示す。

*第13回SPSシンポジウム、2010年10月28-29日に発表

(1) Si

Si のバンドギャップは 1.12eV、ピーク応答波長は 950nm 近辺であるため、標準のものでは 1.064 μm の光を高効率変換することはできない。間接遷移型であるため、実用的な吸収量を得るためにはある程度の厚みが必要になるという欠点もある。

一方、光を閉じ込める技術を適用することにより近赤外領域に感度の高い Si を作製することができる。これによりピーク応答波長を長波長側にシフトさせ 1.064 μm の光を高効率で電気に変換することが可能である。

Si の最大の特長は、現在の太陽電池市場の主流であるために、すでに技術が成熟しており安定性・信頼性が非常に高いこと、安価で大量生産が可能であること等である。高純度 Si 原料の供給不足の問題は続いているが、近年は解消する方向に向かっている。

(2) InGaAs(P)

InGaAs セルは近赤外増感型の Si と並んで、1.064 μm の受光素子の有力候補である。Ga と In の組成を変えることによりバンドギャップを連続的に変えることができるため近赤外領域で使用される。理論的には $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ において $x=0.4$ 程度のとき、バンドギャップが 0.9eV になるので 1.064 μm の光に対しての高い変換効率が期待できる。

しかし、このような組成比の InGaAs を容易に製造できるわけではない。InGaAs は半導体基板の上でエピタキシャル成長させて成長させるが、基板と格子整合させる必要があるため、作製できる組成比には制限が生じてしまう。(例えば、InP 基板の場合は $x=0.53$) ただし、現状開発されている InGaAs でも 1.06 μm に比較的感度の高いものはあるので、それなりの高効率変換は期待できる。

なお、P を加えた InGaAsP については主に光通信用レーザー材料として用いられており、1.06 μm に対しても高感度が期待できるものである。P が入っていると欠陥を自己修復してくれる可能性もあるが、材料が均一に混ざりにくく高い結晶性を得ることが難しい等の問題点もある。

(3) CI(G)S

CIS 系太陽電池は新型の薄膜多結晶太陽電池であり、技術の成熟度は低く、そのパフォーマンスに関しては不明な点が多く残されている材料である。バンドギャップは 1.0eV 付近にあるため、標準型の Si に比べて長波長側に感度の高いセルを作製することができる。また多結晶であるため、大面積化や量産に向いているというのも大きなメリットである。近年では世界的に商業化への動きが加速し、低コスト化に関する研究などが顕著となっている。将来の高効率変換セルという意味では非常に有望であるといえる。

4. 受光素子の変換効率に関する理論的検討

1) 文献調査および専門家へのヒアリング調査から得られた量子効率 η_e の値から短絡電流密度 J_{sc} を求める。→2) ダイオードパラメータである n 値と逆方向飽和電流密度 J_0 の値を決める。→3) 出力を最大にする電流密度 J_m と電圧 V_m を算出する。→4) 効率 η を算出する。という方法で Si (近赤外増感型)、InGaAs、CIS の各セルについて $1.06 \mu\text{m}$ のレーザー光を照射したときの光電変換効率を計算した。ダイオードパラメータである n 値と J_0 の値を決める際には、 n 値は理想的な材料の状態を仮定して 1 とした。 J_0 については、材料のバンドギャップの値から開放電圧 V_{oc} の値を決めて、その V_{oc} 値を用いて算出することとした。ただし、実際の太陽光に対する J_{sc} 、 V_{oc} の測定値があるものはその値も採用した。なお実際には J_0 は温度の関数となっているが、その点は今回の計算では考慮されていない。また光電変換効率は、太陽電池の直列抵抗や並列抵抗により大きく低下するものであるが、今回の計算では抵抗値がどの程度の値になるかについての妥当な数字が不明であったため、抵抗成分はゼロとして計算を行った。今回の計算は、このように理想的な状態を仮定した上での数字であるので、現実にも求められる変換効率の値とは誤差があることに十分留意する必要がある。

以上のような前提条件の下で計算を行った結果を下表にまとめた。なお、入射レーザー光強度 $P_{laser}=1\text{kW/m}^2$ 、 10kW/m^2 および 100kW/m^2 の 3 種類の場合について変換効率を計算した。

表 1 $1.06 \mu\text{m}$ のレーザー光に対する各種セルの変換効率の計算結果

		$P_{laser} = 1\text{kW/m}^2$	$P_{laser} = 10\text{kW/m}^2$	$P_{laser} = 100\text{kW/m}^2$
Si (近赤外増感型)	EgからVoc値を仮定し J_0 を求めた場合	0.47 ($\eta_e=0.70$) 0.59 ($\eta_e=0.88$)	0.50 ($\eta_e=0.70$) 0.64 ($\eta_e=0.88$)	0.54 ($\eta_e=0.70$) 0.68 ($\eta_e=0.88$)
	J_{sc} 、 V_{oc} の計測値から J_0 を求めた場合	0.36 ($\eta_e=0.70$) 0.46 ($\eta_e=0.88$)	0.40 ($\eta_e=0.70$) 0.50 ($\eta_e=0.88$)	0.43 ($\eta_e=0.70$) 0.55 ($\eta_e=0.88$)
InGaAs	EgからVoc値を仮定し J_0 を求めた場合	0.4	0.44	0.48
		* $1.06 \mu\text{m}$ に感度の高いバンドギャップを持つ組成比の InGaAsであれば量子効率が高くなるため、さらなる高効率が期待できる。		
CIS	EgからVoc値を仮定し J_0 を求めた場合	0.43	0.47	0.5
	J_{sc} 、 V_{oc} の計測値から J_0 を求めた場合	0.37	0.41	0.44

試算に用いた各種パラメータの値は、いくつかの (理想的な) 仮定の条件下で出されたものであるため、得られた計算結果は大雑把な指標として見る必要があるが、変換効率は概ね $0.4\sim 0.5$ 程度の値であり、受光素子の種類による大きな差異は見られなかった。ただ

し近赤外増感型 Si セル量子効率の将来見込値 $\eta = 0.88$ を用いた場合は、効率は 0.6 以上と高くなっている。

さらに、Si の場合については変換効率の温度依存性についても検討し計算を行った。温度係数は、 $\eta(25^\circ\text{C})=0.36$ の場合は $-0.65\%/^\circ\text{C}$ 程度、 $\eta(25^\circ\text{C})=0.47$ の場合は $-0.85\%/^\circ\text{C}$ 程度となった。

実際の変換効率を論じる際には、光から電気に変換する部分よりも、その電気を外部に取り出す部分の効率が問題となることが多い。従って素子単体そのものの効率よりも、抵抗を減らしたり、電気を取り出したりする構造部分等が重要となる。また材料や構造のみならず、レーザー強度分布や温度が変換効率に及ぼす影響も大きいため、実際のシステムを検討する際にはそれらの点を十分に考慮する必要がある。今後は、In と Ga の組成比を変えた InGaAs の新規材料開発や CIS の実用化の進展等に合わせて、より現実的なパラメータ値を用いることにより素子単体の変換効率計算の精度を上げるとともに、変換効率に影響を及ぼす素子材料以外の要因（構造、さらにはそれらを使用する環境条件等）についても十分な検討を重ねていく必要がある。を減らしたり、電気を取り出したりする構造部分等が重要となる。

[参考文献]

- ・ 平成 21 年度宇宙航空研究開発機構委託業務成果報告書「L-SSPS におけるレーザー受光素子の動向・適用可能性調査」、シー・エス・ピー・ジャパン株式会社