

レーザーテラヘルツエミッション顕微鏡を用いた 太陽電池計測技術



企業レポート

中西英俊*

Characterization of a solar cell using a laser terahertz emission microscope

Key Words : Photovoltaics, Solar cell, Terahertz wave, Femtosecond laser pulse, Inspection

1. はじめに

再生可能エネルギー開発は、低炭素社会の実現に向けた重要な課題である。特に、太陽光発電は、①膨大で無尽蔵な太陽エネルギーを永続的に利用可能、②太陽電池設置の自由度が高い（都市部の遊休地、送電網のない地域、屋根）などの理由により普及が期待されている。

大日本スクリーン製造（株）は、既存事業の半導体・液晶・印刷製造装置の開発に加え、新規事業としてエネルギー関連事業に取り組んでいる（<http://www.screen.co.jp>）。弊社は、「レーザーテラヘルツエミッション顕微鏡（Laser Terahertz Emission Microscope : LTEM）の太陽電池特性計測への応用」に関して、大阪大学レーザーエネルギー学研究所と共同研究を行なっている。本報告では、上記共同研究の成果を紹介する。今回、多結晶 Si 太陽電池の LTEM 計測結果に加え、単結晶 Si 太陽電池、GaAs 太陽電池の LTEM 計測を行ったので報告する。

2. 背景

再生可能エネルギーの固定価格買取制度が 2012 年 7 月からスタートした。日本国内に於いても、メガワット級の太陽光発電所が数多く設置されている。2013 年太陽電池市場（金額ベース）では、日

本がドイツ・中国を抜いて世界一になるとの予想がある¹⁾。化石燃料を利用した発電との比較に於いて、太陽光発電は割高な発電システムであり、発電コスト削減が喫緊の課題となっている。そのため、太陽光発電の変換効率向上は関連業界において最大のテーマとなっている。

単接合太陽電池の変換効率は、材料のバンドギャップに相関し、Shockley-Queisser 理論限界によれば最大約 30%とされる²⁾。近年、その理論限界を破る第三世代の太陽電池が提案され、その研究が注目を集めている。例えば、量子ドット太陽電池は、理論変換効率が 75%を超えることが示されている³⁾。太陽電池は光をキャリアに効率よく変換するだけでなく、生成されたキャリアを損失なく電極に輸送することが必要なデバイスであり、キャリアの振る舞いを可視化する技術は重要である。

一方、光と電磁波の両方の性質を備えるテラヘルツ波 (THz : 10^{12} Hz) は、フェムト秒レーザーパルス (フェムト秒 : 10^{-15} 秒、光は 1 フェムト秒で $0.3 \mu\text{m}$ 進む) という超短パルス技術の活用を中心に研究開発が進み、現在では、通信、セキュリティ、分析機器、ならびに非破壊検査など、さまざまな分野で注目を集めている^{4,5)}。大阪大学斗内教授が考案した LTEM は、光の分解能で試料の局所電流、電界、および誘電分極構造などをイメージング・検査できることが特長であり、その産業応用が期待されている。

3. LTEM の原理、実験装置構成

LTEM の原理を説明する。ある種の試料（半導体、超伝導体、強誘電体など）にフェムト秒レーザーパルスを照射することにより、THz 波が発生することが知られている。古典的な電磁気論によれば、THz 波は電流・分極の時間変化により発生するこ



* Hidetoshi NAKANISHI

1961年6月生
大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程
修了
現在、大日本スクリーン製造株式会社
技術開発センター 技術開発グループ
画像処理技術部 部長 修士
THz 波技術
TEL : 075-931-7925 内線 8303427
FAX : 075-931-7826
E-mail : nakanisi@screen.co.jp

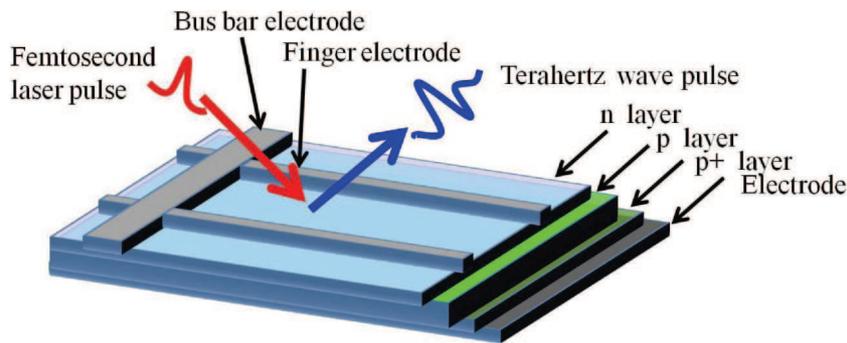


図1 レーザーテラヘルツエミッション顕微鏡 (LTEM) の太陽電池計測応用概念図

とになる。半導体の場合、フェムト秒レーザーパルス照射により発生した光励起キャリアは、p-n 接合、ショットキー接合などの内部電界、あるいは電極に電圧を印加したことによる外部電界によって加速し THz 波パルスが発生する。その THz 波を観測することで材料の局所特性が分析できる。

太陽電池の最も基本的な構成は、図1に示すように Si で作られた大面積の p-n 接合素子、いわゆるフォトダイオードである。太陽電池にフェムト秒レーザーパルスを照射することで、光励起キャリアが生成される。同キャリアは、太陽電池の空乏層領域で加速・分離され THz 波パルスが発生する。上記は、太陽電池にサブピコ秒オーダーの非常に短い時間の発電を引き起こすことを意味する。LTEM 技術を太陽電池特性計測に応用することで、フェムト秒レーザーパルスによる発電状態をテラヘルツ波で捉え、非破壊、非接触でイメージング可能となる⁶⁾。

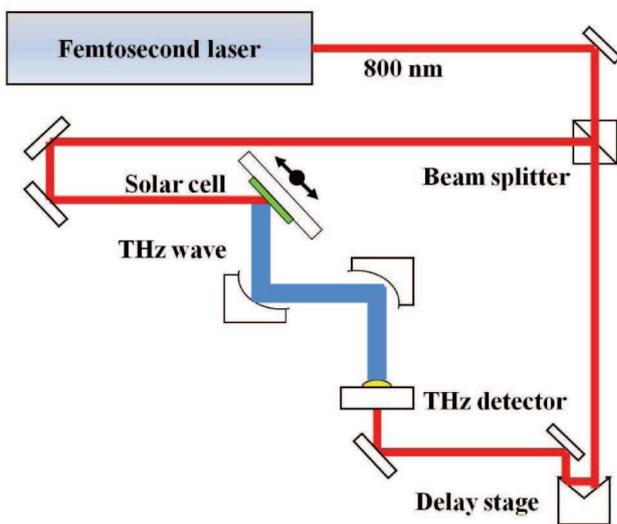


図2 LTEM 装置構成図

図2に本研究開発の実験装置構成を示す。Ti: サファイヤレーザーパルス (波長: 800 nm、繰り返し周波数: 80 MHz、パルス幅: 約 100 fs) を、太陽電池に 45 度の入射角で照射する。太陽電池から放射された THz 波は、放物面鏡を利用して集光し、スパイラル型 LT-GaAs ディテクターで検出する。太陽電池から発生する THz 波が最大となる位置でディレクティブなステージを固定し、太陽電池を保持するステージを2次元に移動させることでイメージデータが得られる。

4. 実験結果

図3に、逆バイアス印可時の多結晶 Si 太陽電池から発生した THz 波時間波形 (a) と THz 波周波数スペクトル (b) を示す。逆バイアスの印加電圧増加とともに THz 波強度が高まる。逆バイアス印加電圧により空乏層領域の電界が強まることで THz 波強度が高まったと考えられる。観測した THz 波は、約 0.1 ~ 0.5 THz の周波数帯域であることがわかる。

次に、多結晶 Si 太陽電池から放射した THz 波のイメージサンプルを図4に示す (逆バイアス電圧 10V、光強度 70mW)。赤色、ならびに青色の領域は発生した THz 波強度が高く、位相が反転している (赤はプラス、青はマイナス)。赤と青色の領域では THz 波位相が逆になっていることを意味する。電極付近は、逆バイアス外部電界の影響により THz 波は強い。電極から離れた領域では、強度分布のムラ (黄色~オレンジ色領域) が観測できる。このムラは多結晶 Si の粒状形状に相関していることが確認できる (図5)。このように、フェムト秒レーザーパルスを照射することで、太陽電池の発電状態を THz 波としてイメージ化することに世界で初めて

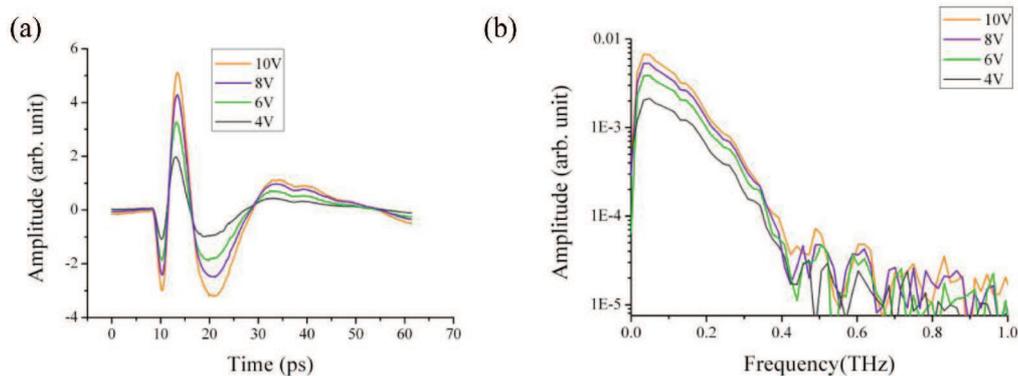


図3 (a) 多結晶Si太陽電池からのTHz波時間波形
(b) 多結晶Si太陽電池からのTHz波周波数スペクトル

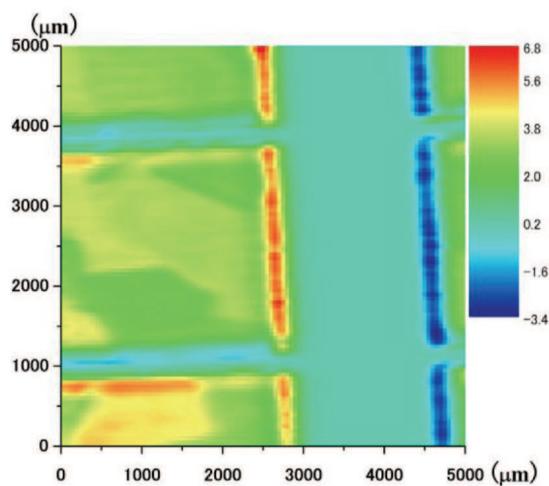


図4 多結晶Si太陽電池LTEMイメージ

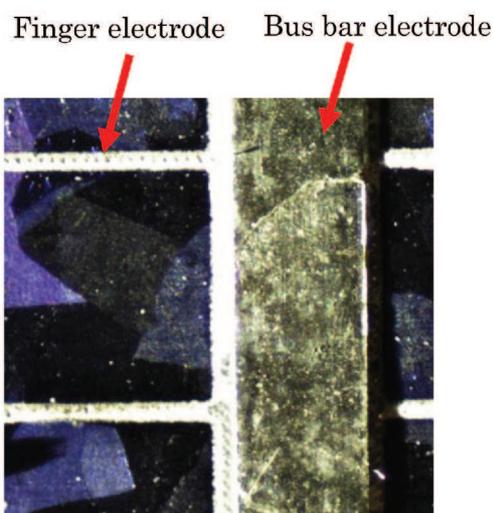


図5 多結晶Si太陽電池光学イメージ

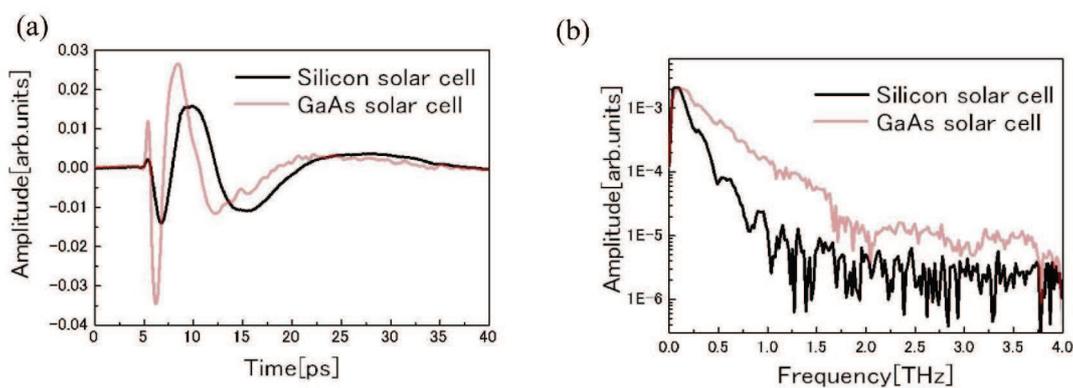


図6 (a) 単結晶Si太陽電池とGaAs太陽電池THz時間波形
(b) 単結晶Si太陽電池とGaAs太陽電池のTHz波スペクトル

成功した。言い換えると、太陽電池の光励起キャリア発生、移動、消滅といった動的な振る舞いを、THz波として可視化する技術を開発したことになる。
図6(a)、(b)に、単結晶Si太陽電池と単接合Ga-

As太陽電池から放射したTHz波時間波形と周波数スペクトルをそれぞれ示す(逆バイアス電圧10V、入射光強度10mW)。図6よりGaAs太陽電池から放射されるTHz波の周波数帯域はSi太陽電池より

広く、その強度はSi太陽電池よりも強いことが分かる。これらの結果は、光励起キャリアの変調がGaAs太陽電池の方が高速であることに起因しており、より詳細な解析によりキャリア移動度や発電効率等に関する情報の抽出が可能であると考えている。

5. まとめ

LTEM 技術を太陽電池計測に応用した。太陽電池にフェムト秒レーザーパルスを照射することで、生成される光励起キャリアの状態をTHz波イメージとして観察することに成功した。太陽電池の局所的な領域の光励起キャリア発生、移動、消滅といった動的な振る舞いが測定できる。さらに、新たな技術として、連続光照射 LTEM⁷⁾、ポンプ・プローブ法を利用した LTEM システム⁸⁾を開発し、太陽電池の局所特性評価に応用している。本提案技術を太陽電池の解析手法の一つとして確立すべく研究開発を進めてゆきたい。

謝辞

本研究開発を進めるにあたり、ご指導を頂いてい

る大阪大学斗内政吉教授、村上博成准教授、川山巖准教授、高山和久技術補佐員に感謝の意を表します。また、大日本スクリーン製造(株)の共同開発者である伊藤明氏、ならびに関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) <http://www.isuppli.com/Photovoltaics/News/Pages/Japan-Set-to-Become-World%E2%80%99s-Largest-Solar-Revenue-Market-in-2013-as-Installations-Boom-in-Q1.aspx>
- 2) W. Shockley and H. J. Queisser : Appl. Phys. **32** (1961) 510.
- 3) 荒川泰彦、他 : 応用物理 Vol.**81** No.7 (2012) 585.
- 4) M. Tonouchi : Nature Photon. **1** (2007) 97.
- 5) 斗内政吉 監修 : テラヘルツ波新産業 (シーエムシー出版, 2011).
- 6) H. Nakanishi, *et al* : Appl. Phys. Express **5** (2012) 112301.
- 7) H. Nakanishi, *et al* : OTST (2013) W5B-6.
- 8) H. Nakanishi, *et al* : CLEO (2013) CM3J.2.

