OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Study of Photoexcited Carriers in Solar Cells Using Terahertz Imaging and Spectroscopy
Author(s)	Salek, Khandoker Abu
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/53991
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Form 3

Abstract of Thesis

Name （Khandoker Abu SALEK）	
Title	Study of Photoexcited Carriers in Solar Cells Using Terahertz Imaging and Spectroscopy (テラヘルツ分光およびイメージングを用いた太陽電池の光励起キャリアに関する研究)

Solar cells have attracted much attention due to the increasing energy demands for the future. In order to get higher solar energy conversion efficiency, characterization and inspection techniques that will help in improving device function are very important. In this thesis, we demonstrate the use of terahertz (THz) spectroscopy and imaging as promising techniques for evaluation and inspection of solar cell devices. THz techniques were applied to study the optical properties and the dynamics of photoexcited carriers in silicon and silicon-based solar cells under the illumination of continuous wave (CW) ultraviolet (UV) and near infrared (NIR) light. Parameters such as conductivity, charge carrier density and mobility, and lifetime were examined, without the need of electrical contacts, using terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS). The dynamics of the local photoexcited carriers in solar cell was also studied using laser terahertz emission microscope (LTEM). This thesis consists of the following chapters:

Chapter 1 covers the background, the purpose and the structure of the thesis.

In Chapter 2 we discuss some photovoltaic concepts such as the fundamentals of a p–n junction, charge carrier generation, recombination mechanisms, and quantum efficiency of solar cell.

In Chapter 3 the THz spectroscopy and imaging systems used in this thesis are explained. THz generation and detection methods are also reviewed and the theoretical concepts needed for the extraction of material parameters from data are introduced.

In Chapter 4 we investigate the optical properties (such as complex refractive index, conductivity, charge carrier density and mobility) of semi-finished single crystalline Si solar cells using transmission THz-TDS. The conductivity was analyzed using the simple Drude model. The mobility of the excess carriers increases nonlinearly with the illumination power and tends to saturate at higher power for NIR laser. This phenomenon was explained by the carrier trapping effect in the impurity region in the bandgap of solar cells. The excess carriers generated by UV light illumination have minimal effect on the measured optical properties of the sample. These results were explained by considering the difference in the penetration depth of NIR and UV light.

In Chapter 5 we investigate the surface recombination velocity (SRV) and carrier lifetime in silicon wafer. The SRV was extracted using the SRH model and we observed that the charge carriers excited by UV illumination significantly changed the SRV by modifying the surface potential. The dynamics was explained using the energy band diagram for silicon under UV light illumination. The effective lifetime of excess carriers excited by NIR laser was measured under steady state conditions and it was found that it depends on the excess carrier density.

In Chapter 6 we investigate optical properties in high resistivity doped silicon and single crystalline Si solar cell using reflection THz-TDS. The measured reflectance and refractive index of the silicon were in good agreement with reported values. The reflectance (and the refractive index) measured in the front surface of the single crystalline Si solar cell is much higher than that of silicon. . In addition, no significant change in the THz reflection was observed for the samples when illuminated by UV and NIR radiation.

In Chapter 7 we present a LTEM study for a polysilicon solar cell. The THz wave emission image directly reflects

the local electric field distribution in solar cell when illuminated by femtosecond laser. The effects of NIR and UV illumination on the THz wave emission from solar cell were examined under different voltage bias conditions. THz wave emission images showed that the THz emission gradually decreased with increasing illumination power. These changes were explained using the band structure of the illuminated solar cell.

In Chapter 8 we draw out the conclusions based on the findings in this thesis.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（　Khandoker Abu SALEK　）

	(職)	氏　名
論文審査担当者		
主 査	教 授	斗内 政吉
副 査	教 授	伊藤 利道
副 査	准教授	川山 巌
副 査	准教授	村上 博成
副 査	教 授	森 勇介
副 査	教 授	片山 光浩
副 査	教 授	八木 哲也
副 査	教 授	尾崎 雅則
副 査	教 授	栖原 敏明
副 査	教 授	近藤 正彦
副 査	教 授	森 伸也

論文審査の結果の要旨

近年、テラヘルツ波を利用した分光・検査技術の進歩により、バイオ、セキュリティ、医療など様々な分野での応用が見込まれている。半導体材料や電子デバイスの評価・検査技術としてもその有効性が明らかになりつつあり、次世代の電子デバイス産業に貢献することが期待されている。本研究は、この様なテラヘルツ波分光技術を、太陽電池の評価手法として応用するための基盤研究を行ったものである。太陽電池は、太陽光を電気エネルギーに変換するデバイスであり、その高効率化は再生可能エネルギーの有効利用のための重要な課題となっている。太陽電池に超短パルステラヘルツ波を照射し、その透過率もしくは反射率を計測するテラヘルツ波時間領域分光法(THz-TDS)を用いることにより、太陽電池内部で発生したキャリアの密度や移動度など、発電効率の向上に欠かせないこれら物理量に関する情報を、非接触で、すなわち電極による電気的接触なしに取得することができる。また、太陽電池にフェムト秒パルスレーザーを照射し、太陽電池から発生するテラヘルツ波を分光・イメージングするテラヘルツ放射分光・イメージング法により、太陽電池内部の電界分布やキャリアの発生量の分布などを観測可能である。本研究では、上記のようなテラヘルツ波分光法を連続発信(CW)レーザーと組み合わせることにより、より発電状態に近い環境での太陽電池の特性評価を行った。この様な取り組みは、太陽電池の新たな検査・評価技術として産業界からも大きな注目を浴びている。本論文はこれらの研究結果をまとめたものであり、得られた主たる 研究成果を以下に要約する。

(1) 紫外線および赤外線領域の CW レーザー照射下において、単結晶シリコン太陽電池にたいして透過型 THz－TDS を行った。THz-TDS で得られた光学伝導度スペクトルを Drude モデルで解析することにより、励起キャリア密度、移動度および緩和時間等を求めた。CW 赤外線レーザー照射下においては、励起キャリアの移動度は、照射 CW レーザーパワーに対して非線形に増加し、高いパワー領域では飽和して一定となるという挙動が見られた。この様な振る舞いは、ギャップ内の不純物準位へのキャリアのトラップを考慮することにより説明できる。また、紫外線 CW レーザー照射下においては、赤外線レーザーほど大きな変化は見られなかった。これは、紫外線の侵入長が赤外線に比べて短く、生成したキャリアが表面再結合によって直ちに消失するためであると説明できる。

(2) 太陽電池材料である、ｐ型シリコンウェハーの紫外線および赤外線 CW レーザー照射下における特性を透過型 THz－TDS を用いて計測した。この実験において、シリコン表面における光励起キャリアの表面再結合速度を見積もることに成功した。表面再結合速度の計算には Shockley-Read-Hall(SRH)モデルを用いた。紫外線 CW レーザー照射下における表面再結合速度は、レーザーパワーの増加に伴い徐々に減少していくことが分かった。この様なレーザーパワー依存性は、CW レーザーによって発生した光励起キャリアが表面におけるバンド構造を変化させることが原因であると考えている。シリコンウェハーの表面には自然酸化膜があり、その界面準位は通常は正に帯電しているため、シリコン表面のポテンシャルが低下し、その影響でシリコンのバンドは下方に湾曲している。これ

が、紫外線レーザー照射によって発生する電子によりより中和されることにより、表面バンドの曲がりが小さくなる。すなわち、半導体表面における電界が小さくなり、この電界によるドリフトによって表面に到達するキャリア密度が減少するため、表面再結合速度が低下すると解釈できる。また、赤外線 CW レーザー照射下では、シリコンウェハー内部まで光が到達するため、再結合速度はバルクにおける再結合速度に近いことがわかった。

(3) 反射型 THz－TDS システムを構築し、シリコンウェハーおよび単結晶シリコン太陽電池を計測した。テラヘルツ波の透過率が低い高ドープのシリコンや背面に電極が蒸着さているため、テラヘルツ波が透過できない市販の太陽電池は、透過型 THz-TDS では測定することができない。この様な試料では反射型システムが有効である。しかしながら、反射型システムは、テラヘルツ波の光路長が変化しやすく、透過型に比べて時間領域測定は格段に難しくなる。本研究において、反射型 THz－TDS によりシリコンウェハーおよび単結晶シリコン太陽電池の誘電率の計測に成功した。紫外線および赤外線レーザー照射下においても同様の測定を行ったが、レーザー照射による優位な変化は観測されなかった。

(4) 赤外線および紫外線 CW レーザー照射下において、テラヘルツ放射分光・イメージングを用いて多結晶太陽電池を評価した。CW レーザー照射によって放射テラヘルツ波強度が減少した。これは、CW レーザーによって発生した光励起キャリアによって、電界がスクリーニングされたためであると考えている。太陽電池からのテラヘルツ波発生は、空乏層近辺で発生したキャリアが空乏層電界により加速されることに起因している。すなわち、CW レーザー励起により発生したキャリアがスクリーニング効果によって空乏層電界を遮蔽するため、派生するテラヘルツ波強度が減少する。また、この効果は紫外線レーザーよりも赤外線レーザーのほうが大きい。これは、紫外線レーザーでは太陽電池表面近傍のみ励起されるので、表面再結合によりキャリアの増加が抑制されるからであると考えられる。また、放射テラヘルツ波の強度のマッピングを行った。その際、CW レーザー照射により放射テラヘルツ波強度が減少するのは前述のとおりであるが、その減少する割合が場所によって異なっていることが分かった。これは、多結晶シリコン太陽電池中のドメインごとの品質の違いに起因していると考えている。このことは、この様な CW レーザー照射下におけるテラヘルツ波放射分光・イメージングが太陽電池の評価法として有望であることを示している。

以上のように、本論分は太陽電池およびその材料となる半導体に対して、CW レーザー照射下で様々な種類のテラヘルツ波分光測定を行い、CW レーザー照射の影響を解析し、これら太陽電池関連試料の分析手法としての有効性を検証したものである。これらの結果は、太陽電池の新規な評価技術として非常に有望であることを示しており、将来的に太陽電池の高効率化に貢献すると考えられる。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。