



Title	レーザーテラヘルツエミッショニ顕微鏡を用いたシリコン太陽電池局所特性評価システムの開発
Author(s)	中西, 英俊
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/55947">https://hdl.handle.net/11094/55947</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏名 ( 中西英俊 )	
論文題名	レーザーテラヘルツエミッション顕微鏡を用いたシリコン太陽電池局所特性評価システムの開発
論文内容の要旨	
<p>本論文は、著者が、大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻博士後期課程において実施した、レーザーテラヘルツエミッション顕微鏡(Laser Terahertz Emission Microscope:LTEM)を用いたシリコン太陽電池局所特性評価システムの開発に関する研究成果をまとめたものであり、以下の6章で構成される。</p> <p>第1章では、本研究の背景を述べ、本研究の重要性を明らかにし、解決手段および目的を述べた。</p> <p>第2章では、まず、テラヘルツ波技術の研究背景を説明し、半導体からのテラヘルツ波の放射・検出原理、テラヘルツ波計測システムを説明した。次に、太陽電池研究開発の背景・状況、太陽電池基本構造を概説した後、LTEMによって太陽電池から放射されるテラヘルツ波の発生機構について述べた。</p> <p>第3章では、LTEMを多結晶Si太陽電池に適用し、テラヘルツ波の放射原理、太陽電池の構造、実験条件から、太陽電池空乏層内の過渡電流によってテラヘルツ波が発生していることを明らかにした。LTEMイメージング実験では、多結晶Si結晶粒と相関性が高いことを述べた。多結晶太陽電池は、Si、CIGS、CdTe太陽電池において製品化されており、LTEMが多結晶太陽電池評価にも応用できる可能性を示した。</p> <p>第4章では、従来の太陽電池評価技術であるエレクトロルミネセンス/フォトルミネセンス/レーザービームインデュースドカレントイメージング手法とLTEM技術の比較実験を行い、LTEMの原理を踏まえた知見により従来手法との相違点を述べた。LTEMイメージは、従来の太陽電池評価イメージと比べて明らかに異なった結果を示しており、LTEMは、従来評価手法に対して相補的な評価技術として有効であることを見出した。</p> <p>第5章では、ポンプープローブ技術をLTEMに組み込んだダイナミックテラヘルツエミッション顕微鏡(Dynamic Terahertz Emission Microscope:DTEM)を、多結晶Si太陽電池に応用し、結晶粒界に於ける数ピコ秒の非常に高速な物理変化を表すデータ、イメージ取得に成功し、その意義について述べた。LTEMが、次世代太陽電池研究開発で必要とされる超高速光励起キャリアダイナミクス計測に利用できることを示した。また、単結晶Si太陽電池と多結晶Si太陽電池の緩和時間を計測し、シミュレーション結果による知見を述べた。フォトルミネセンスで直接的に計測が困難であった太陽電池エミッター層の高ドープ領域のAuger再結合情報が、DTEMに反映されていることを示した。</p> <p>第6章では、本研究を総括した。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 ( 中西英俊 )		
	(職)	氏名
論文審査担当者	主査	教授 斗内政吉
	副査	教授 尾崎雅則
	副査	准教授 村上博成
	副査	准教授 川山巖
	副査	教授 伊藤利道
	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 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

低炭素社会の実現に向けて再生可能エネルギーの利用が必要とされており、太陽光発電は、風力、水力、地熱発電に比べて、設置期間、設置場所で自由度が高く、従来エネルギー並みの発電コスト実現に向けての期待が高い。現在、太陽電池市場の90%を占める結晶Si太陽電池は、今後もその重要性が高まっていくと予想できる。さらに、IoT(Internet of Things)の普及により、Siを材料とするセンサーデバイスが爆発的に増え、そのデバイスへの電力供給源として、結晶Si太陽電池技術が期待されている。このように今後も、太陽電池市場の主力とされる結晶Si太陽電池は、変換効率・コスト削減・耐久性向上のため、その分析技術の開発も重要である。

本研究では、レーザーテラヘルツエミッション顕微鏡(Laser Terahertz Emission Microscope:LTEM)技術を太陽電池評価に応用しその有効性を詳細に検討している。LTEMでは、フェムト秒パルスレーザーを太陽電池に照射し、太陽電池の内部で高速に変調する過渡電流を発生させ、それにより放射されるテラヘルツ(THz)波パルスを、検出・可視化している。太陽電池内部では、p-n接合、電極-半導体界面、パッシバーション膜などの近傍に内部電界が存在し、この内部電界によりキャリアが駆動されTHz波が発生する。そのためLTEMにより、従来技術では困難であった太陽電池およびその材料の、表面や接合界面における光励起キャリアダイナミクスが非接触で分析可能となる。本論文では、LTEMを新しい太陽電池評価技術として提案し、LTEMの有効性を実証している。主な成果は以下の3点である。

- ① LTEMによって結晶Si太陽電池から放射されるTHz波は、太陽電池の空乏層領域に於ける過渡電流によるものであることを実験的に明らかにした。太陽電池から放射されるTHz波の振幅が、印加する逆バイアス電圧により増強されることを見いたし、空乏層電界が光励起キャリアを駆動し、THz波を発生させていることを示している。このことは、太陽電池の基本機構であるp-n接合の電界情報を、感度良く計測可能であることを示唆している。通常、空乏層は太陽電池の表面近傍(～数百nm程度)にあり、LTEM像は表面構造や結晶粒界の影響を強く受ける。そのため、多結晶Si結晶粒の光学イメージとLTEMイメージ間で高い相関性があることを確認できた。また、多結晶太陽電池は、Siの他に、CIGS、CdTe太陽電池において製品化されており、このような材料を用いた、多結晶太陽電池評価にも応用が期待できる。
- ② LTEM技術の太陽電池分析手法としての実用性を確認するため、LTEM技術と従来の太陽電池分析技術であるエレクトロルミネセンス(EL)/フォトルミネセンス(PL)/レーザービームインデュースドカレント(LBIC)法との比較検証実験を行った。その結果、LTEMイメージは、EL/PL/LBICイメージと比べて明らかに異なり、従来手

法では得られない情報が THz 信号に反映されているため、従来手法と相補的に用いることで、有望な検査手法となりうることを明らかにした。実験では、従来手法では、太陽電池内部に存在すると思われる線上の欠陥が主に観察されたのに対して、LTEM では表面・粒界構造や、空乏層や表面電界の不均一に起因すると思われるイメージが得られた。前述のように、LTEM の信号強度は空乏層近辺の光励起キャリアの変化量、ならびに空乏層の内部電界により加速・移動した情報を含んでおり、太陽電池の空乏層を含む表層部の光励起キャリアの情報が反映している。これに対して、EL/PL/LBIC 等の手法は、主にデバイス内部におけるキャリアの再結合の影響を強く受けるため、LTEM とは観測している領域が異なっている。また、EL や PL はキャリアの再結合の際の発光を見ているのに対して、LTEM はキャリアの励起およびその後の移動による光電流により発生する THz 波を観測していることも、取得するイメージが異なる原因となっている。このような LTEM の特性は、従来手法に比べて表面・粒界構造、表面電界、空乏層の劣化などに敏感な検査手法として展開できることを示唆している。

- ③ ポンプ-プローブ技術を LTEM に組み込んだダイナミックテラヘルツエミッショングループ(Dynamic Terahertz Emission Microscope:DTEM)を、多結晶 Si 太陽電池に応用し、数ピコ秒の超高速なキャリア密度の変化を示すデータ、イメージ取得に成功した。特に、結晶粒界においては励起キャリアによる電界のスクリーニングが他の領域よりも顕著に見られ、これはキャリアの欠陥サイトへのトラップによるものであるとして説明可能であることを示している。また、単結晶 Si 太陽電池と多結晶 Si 太陽電池の光励起キャリアの緩和時間を同手法で計測し、光励起キャリアの再結合寿命を見積もっている。その結果、蛍光ルミネセンスで直接的に計測が困難であった、太陽電池エミッター層（高ドープ領域）の Auger 再結合がキャリア寿命に大きく影響を与えることを結論付けている。このように、DTEM を太陽電池に応用することで、ピコ秒からナノ秒オーダーの太陽電池内部の局所的な電場変化やキャリア寿命等の情報を取得でき、これらの情報が必要とされる次世代太陽電池の特性評価技術に利用できることを示している。

以上のように、本論文は、LTEM を太陽電池に応用することで、結晶 Si 太陽電池の表面・粒界構造や空乏層領域の電界、ならびに次世代太陽電池の研究開発に必要な光励起キャリアダイナミクスが分析可能であることを示している。これらの成果は、テラヘルツ波技術の産業応用として、太陽電池計測分野を拓くものであり、大きな意義を持つものである。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。