

## 審査の結果の要旨

氏名 原 賢二

本論文は、「太陽電池材料に対する原子間力顕微鏡を用いた局所的熱分光測定に関する研究」と題し、光照射下に置かれた被測定試料において生じる光吸収による熱膨張量を、高い測長能力を有する原子間力顕微鏡 (AFM) によって計測する熱分光測定を実現するとともに、同手法を太陽電池材料に適用して、その局所的な非発光再結合特性の評価を行った結果について述べたものであり、全 5 章から成っている。

第 1 章は「序論」であり、本研究の背景を解説している。地球温暖化やエネルギー問題への対応策として注目されている太陽電池について、本研究において注目した多結晶 Si 太陽電池と CuInSe<sub>2</sub> [CIS]系太陽電池の研究背景に言及している。太陽電池の高効率化を実現するためには非発光再結合に関する知見が有用であり、その評価に適した手法としての熱分光法を紹介している。さらに、局所領域において熱分光法を実現するための走査プローブ顕微鏡技術について述べている。また、本論文の構成を述べている。

第 2 章は「原理」と題し、一般的な AFM の原理について述べた後、AFM による局所的熱分光測定の原理を述べている。AFM 熱分光測定では、断続光照射の条件下にて試料に生じる周期的な熱膨張の量を熱信号 (PT 信号) として観測しているが、この PT 信号を高感度に検出し、かつ断続光照射時に生じる不要な信号成分を除去する目的で著者らが開発した二重サンプリング (DS) 法について、その動作原理を述べるとともに、基本的な実験系を示している。その後、被測定試料として用いた多結晶 Si 太陽電池試料と CIS 系材料のひとつである Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> [CIGS]薄膜試料について、その構造等を述べている。

第 3 章は「多結晶 Si 太陽電池に対する局所的熱分光測定」と題し、多結晶 Si 太陽電池における PT 信号の測定結果を述べている。まず、試料の熱膨張量について、熱拡散方程式に基づく計算値と実験で得られる値がオーダ的に一致することを示している。また、Σ3 結晶粒界近傍にて PT 信号の増大が観測されることを示し、その領域に非発光再結合中心が多く存在していることがその理由として考えられることを述べている。次に、単結晶 Si 太陽電池に対する表面清浄化処理の有無と観測される PT 信号との関連性などを元にして、正規化した PT 信号の照射光波長依存性から少数キャリア拡散長の比較が可能であること、また、実際、多結晶 Si 太陽電池において異なる結晶粒の間に少数キャリア拡散長の差が見られること、を示している。さらに、本測定とケルビンプローブフォース顕微鏡 (KFM) による表面ポテンシャル測定をそれぞれ遂行して、PT

信号が増加する領域と表面ポテンシャルが低下する領域との間により一致が見られることを見出すとともに、これらの結果は、偏析した不純物が非発光再結合中心として働いている可能性を示す一方で、結晶粒界の電気的活性度は粒界の種類には単純には依存せず不純物の偏析によって強く影響されることを示唆している、ということを描している。さらに、フォトルミネッセンス (PL) 法にて深い準位 (0.77 eV 付近) からの発光が確認できる結晶粒界の近傍にて、0.78 eV を中心光子エネルギーとする近赤外光レーザを照射光源とした AFM 光熱分光測定を行った結果、そのような領域では PT 信号も増大することから、AFM 光熱分光測定では、照射光波長を適宜選択することによって、そのような深い準位の空間分布の可視化が可能であることを明らかにしている。これらの結果を通じて、AFM 光熱分光法が非発光再結合特性の評価に有効であることを明らかにしている。

第 4 章は「CIGS 薄膜に対する局所的な光熱分光測定」と題し、CIGS 薄膜における PT 信号の測定結果を述べている。まず、PT 信号の空間分布と結晶粒や粒界の位置との間には一般性を持った対応関係が確認できなかったことから、CIGS 材料の結晶粒界は基本的には電気的に不活性であることを指摘している。その一方で、一部の結晶粒界近傍においては PT 信号の増大が見られており、これらの結晶粒界は非発光再結合中心を多く含んだ質の悪いものとなっていることを明らかにしている。また、0.89 eV を中心光子エネルギーとする近赤外光レーザを光源とした光熱分光測定を行い、特定の結晶粒界近傍において PT 信号の増大が確認されたことから、そのような結晶粒界近傍に深い準位が存在している可能性を指摘している。

第 5 章は「結論」であり、本論文全体の研究成果をまとめて要約しているとともに、今後の展望として、光子エネルギーの異なる光源によって深い準位を選択的に励起する光熱分光測定を行うことで不純物空間分布の可視化を実現できる可能性があることや、他の計測手法との併用によってバンドプロファイルと非発光再結合特性の関連性の議論が可能となることを述べている。

以上これを要するに、本論文は、新たに提案した二重サンプリング法を導入した AFM 局所光熱分光測定法について、まず、多結晶 Si 太陽電池上での計測を通じて、光熱信号の空間分布の観測やその起源の議論が可能であること、太陽電池材料の主要パラメータのひとつである少数キャリア拡散長の差を議論できること、などを明らかにすることによって、計測手法としての有効性を示すとともに、同手法を太陽電池用 CIGS 薄膜に適用して、結晶粒界が基本的には電気的に不活性である一方で、一部の領域には深い準位などの非発光再結合中心が偏在している可能性があることを指摘するなど、同材料を応用する上で有益な知見を示したものであり、電子工学上、寄与するところが少なくない。

よって本論文は、博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。