

称号及び氏名	博士（工学） 奥野 泰希
学位授与の日付	2017年3月31日
論文名	「宇宙太陽電池の低エネルギー電子線照射影響に関する研究」
論文審査委員	主査 奥田 修一 副査 河村 裕一 副査 松浦 寛人

論文要旨

地球周辺の宇宙放射線は、主に地球の地磁気に捕獲された電子および陽子からなる。宇宙太陽電池は、人工衛星の主要な電源として使用されているが、これらの放射線によって、その出力が低下していく。この低下の主な要因は、太陽電池内の原子と放射線の相互作用によって生成される欠陥であると考えられている。この放射線による出力の低下を考慮し、人工衛星の運用予定期間中に太陽電池から十分な電力が供給できるようにソーラーパネルの設計を行う必要がある。そのため、放射線によって生成された欠陥が太陽電池の出力に与える影響を解明することで、太陽電池の劣化予測モデルが考案されてきた。

宇宙太陽電池が運用中にさらされる放射線は、広いエネルギー範囲の陽子や電子であるため、これらの粒子線が太陽電池の性能へ及ぼす影響を考慮する必要がある。Displacement damage dose (DDD) 法は、Naval Research Laboratory によって提案された太陽電池の劣化予測モデルであり、Non-ionizing energy loss (NIEL) と呼ばれる関数を使用することにより、宇宙放射線による太陽電池の劣化を最低3回の地上試験のみで予測することが可能であるという利点がある。NIELは、1個あたりの粒子線がはじき出しによる変位損傷を引き起こすために材料に付与するエネルギー量を表す関数である。NIEL値を計算するために、物理量としてはじき出し閾値エネルギー (E_d) が使用される。Bragg rule に従って重量分率によって粒子線が原子に付与するエネルギーが決定され、付与されるエネルギーが E_d を超えた場合に、NIEL値として換算される。

宇宙太陽電池は、高変換効率、高耐放射線性、低重量および低コストを有することが要求される。3 接合 (3J) 太陽電池は、比較的これらの条件を満たしており、宇宙太陽電池と

して主に使用されている。Indium Gallium Phosphide (InGaP) 太陽電池は、3J 太陽電池のトップサブセルであり、3J 太陽電池のサブセルにおいて最も高い耐放射線性を有する。3J 太陽電池の劣化予測モデルの精度を向上させるために InGaP 太陽電池へ高エネルギー(1 MeV)の電子線を照射することによって、照射欠陥と出力低下の関係について研究されてきたが、低エネルギーの電子線においては、カバーガラスなどの遮蔽材による影響でほとんど透過することがないと考えられており、ほとんど研究されてこなかった。しかし、近年フレキシブル化による遮蔽材の薄型化が検討されているため、低エネルギー電子線が太陽電池へ及ぼす影響を検討する必要がある。

InGaP の構成元素における電子線 NIEL 値の計算結果から、変位損傷を引き起こす電子線のエネルギー閾値 (E_{th}) を求めた。P、Ga および In の E_{th} は、それぞれ約 100、280 および 300 keV であることが分かった。そのため P 変位損傷由来の欠陥は、100 – 280 keV 程度のエネルギーを有する電子によって生成される。Ga および In の変位損傷由来の欠陥は、300 keV を超えるエネルギーを有する電子によって生成される。これは、電子線エネルギーによって変位損傷の種類を選択できることを示唆している。

本論文は、第 8 章によって構成されており、太陽電池の原子の変位損傷の種類を選択することが可能である低エネルギー電子照射が太陽電池に与える影響について評価を行ったこと、および低エネルギー電子線照射における DDD 法による適切な劣化予測手法を考案したことについて述べる。

それぞれの章について概要を以下に記載する。

第 1 章は、緒言であり、本研究に関わる宇宙太陽電池の歴史や発展、また放射線による太陽電池の劣化の予測手法に関して述べ、本研究の意義および目的を明確にした。

第 2 章では、低エネルギー電子線照射による InGaP 太陽電池の性能劣化傾向について検討した結果を述べる。NIEL 値より予測された E_{th} を参考に、InGaP 太陽電池へ照射する電子線のエネルギーを選択し、照射試験を行った。低エネルギー電子線照射では、高フルエンスの領域において、短絡電流の低下が電子線エネルギーに依存することが観測された。また開放電圧 (V_{oc}) は低フルエンスから高フルエンスの領域においてエネルギーに依存して劣化が大きくなることが明らかになった。また、NIEL で予測された E_{th} 以下のエネルギーである 100 keV 以下の電子線を InGaP 太陽電池へ照射した際に、 V_{oc} の顕著な劣化が観測された。この劣化現象は、DDD 法による劣化予測モデルでは説明がつかないため、本研究では、様々な検討を行い、その結果を第 3 章から第 6 章にまとめた。

第 3 章では、NIEL で予測された E_{th} 以下のエネルギーの電子線による GaAs 太陽電池の劣化について検討した結果を述べる。前章で述べた、DDD 法による劣化予測と低エネルギー電子線照射による InGaP 太陽電池の劣化が一致しないことは、宇宙太陽電池の劣化予測手法において運用時間の決定に影響を与える可能性がある。そのため、この現象が、InGaP 太陽電池固有の現象であるか、また他の太陽電池でも同様の劣化が起きるかを検討した。3J 太陽電池において GaAs 太陽電池はミッドサブセルに使われており、この GaAs 太陽電池

を用いて低エネルギー電子線照射による劣化を評価した。その結果、GaAs 太陽電池は、NIEL で予測された E_{in} 以下のエネルギーの電子線の照射によって、ほとんど劣化しなかった。そのため、 E_{in} 以下のエネルギーの電子線照射による劣化は InGaP 太陽電池固有の現象であることが確認された。また 1 MeV 電子線照射による先行研究では、GaAs 太陽電池の耐放射線性は InGaP 太陽電池より低いと考えられているが、低エネルギー電子線照射ではこれらの耐放射線性の傾向が逆転することが明らかになった。

第 4 章では、100 keV 以下の電子線による InGaP 太陽電池のキャリア挙動への影響を評価した結果を述べる。NIEL で予測された E_{in} より低い 70 keV の電子線を InGaP 太陽電池に照射し、外部量子効率およびエレクトロルミネッセンスの評価を行った。その結果、InGaP 太陽電池に非発光再結合中心の増加が観測されたことより、深い準位をバンド内に生成する照射欠陥が導入されたことが明らかになった。またこの非発光再結合中心の増加は、太陽電池の V_{oc} の低下を引き起こす要因であると考えられており、InGaP 太陽電池の性能の劣化傾向と一致している。

第 5 章では、100 keV 以下の電子線照射によって InGaP 太陽電池に生成された欠陥について評価した結果を述べる。前章より 70 keV 電子線照射によって深い準位の欠陥が InGaP 太陽電池に生成された事が明らかになった。そのため、Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS)法を用いて InGaP 太陽電池中に 70 keV 電子線照射で生成された照射欠陥の評価を行った。DLTS 測定の結果、100 keV 以下の電子線照射によって InGaP 太陽電池にリンの変位損傷由来の欠陥であるリンの空孔-格子間原子由来の信号が確認された。リンの変位損傷はこれまでの NIEL による予測では、100 keV 以下の電子線では引き起こされないと考えられてきたが、この空孔-格子間原子の発見によって 100 keV 以下の電子線照射によってリンの変位損傷が起きていることが明らかになった。

第 6 章では、低エネルギー電子線照射による InGaP 太陽電池の劣化メカニズムについて検討した結果を述べる。変位損傷では、入射粒子線が原子へ付与したエネルギーが E_d を超えた場合、結晶中に安定な照射欠陥が生成すると考えられている。 E_d は NIEL の E_{in} に影響を与えるパラメータであることから、本研究では、新しく E_d の評価手法を構築し、InGaP 中のリンの E_d について評価した。その結果、InGaP 中のリンの E_d は従来考えられていた 9 eV ではなく、4 eV であることが明らかになった。そしてこの新しく取得した E_d を用いた DDD 法による劣化予測は、InGaP 太陽電池の低エネルギー電子線照射による劣化と良く一致することが明らかになった。また NIEL に用いられている E_d は DDD 法による劣化予測における重要なパラメータであるが、最適な取得方法が確立されておらず、あまり評価されてこなかった。そのため、DDD 法による適切な劣化予測を行うために、本研究で考案した新しい E_d 取得方法を DDD 法による劣化予測の手順に導入することを提案した。

第 7 章では、大気圧プラズマの発生装置の作製および最適化に関する検討を行った結果を述べる。低エネルギー電子線照射による太陽電池の劣化として表面効果による影響も考えられるためプラズマによる表面改質を行うことによって、その影響を評価する必要がある

る。そのため、誘電体バリア放電を利用した大気圧プラズマ発生装置を構築し、さらにそのプラズマで発生したラジカルなどを分光測定によって明らかにした。この結果より、今後プラズマの太陽電池への影響について検討を行うことが可能になった。

第8章では、本論文の結論を述べ、本研究で得られた結果を総括した。

審査結果の要旨

本論文は、人工衛星の主要な電源として使用されており最も高い耐放射線性を有する InGaP 太陽電池の、低エネルギーの電子線による性能劣化に関する新たな発見についての研究成果をまとめると共に、新たな劣化予測手法について提案したものである。本学の特徴ある電子加速器を活用して、次のような研究成果を得ている。

(1) InGaP 太陽電池に、電子線のエネルギーを選択して照射試験を行った。従来劣化しないとされていた 100 keV 以下の電子線をこの太陽電池に照射した際に、予想されていなかった顕著な劣化が初めて観測された。この劣化現象は、宇宙太陽電池の運用時間に大きく影響を与える現象である。

(2) 比較のために行った実験で、エネルギー100 keV 以下の電子線の照射により、GaAs 太陽電池は、ほとんど劣化しなかった。そのため、電子線照射による劣化は InGaP 太陽電池固有の現象であることが確認された。

(3) InGaP 太陽電池に電子線をエネルギー70 keV で照射し、外部量子効率の測定およびエレクトロルミネッセンスの測定を行って結果を解析した結果、太陽電池のバンド内に深い準位を生成する照射欠陥が導入されたことが明らかになった。深い準位過渡分光法を用いて照射欠陥の評価を行った結果、変位損傷由来の欠陥であるリンの空孔が確認された。これまで引き起こされないと考えられてきた、リンの変位損傷が起きていることが明らかになった。

(4) 本研究の成果に基づき、低エネルギー電子線照射による InGaP 太陽電池の劣化メカニズムについて検討した結果、InGaP 中のリンの変位エネルギーは、従来から考えられていた 9 eV ではなく、4 eV であることが明らかになった。この変位エネルギーを求める新しい方法を劣化予測の手法に導入することを提案した。

以上の研究成果は、人工衛星の主要な電源である InGaP 太陽電池の放射線による劣化に関する新たな現象を見出し、その機構を明らかにしたものである。この結果は太陽電池劣化の予測精度の向上に役立ち、今後の宇宙開発に大きく貢献するものである。また、申請者が自立して研究活動を行うにあたり、必要な能力と学識を有することを証したものである。