

Study on VHF Plasma Characteristics by Laser Thomson Scattering

陳, 韋廷

<https://doi.org/10.15017/1398402>

出版情報 : 九州大学, 2013, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 : 全文ファイル公表済

氏名・(本籍・国籍)	チェン ウェー ティン 陳 韋 廷 (中国 (台湾))
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	総理工博甲第870号
学位授与の日付	平成25年9月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 総合理工学府 量子プロセス理工学専攻
学位論文題目	Study on VHF Plasma Characteristics by Laser Thomson Scattering (レーザートムソン散乱を用いた超高周波プラズマ特性の研究)
論文調査委員	(主査) 教授 内野 喜一郎 (副査) 教授 服部 励治 准教授 山本 直嗣

論文内容の要旨

太陽電池は、環境にやさしいエネルギー源として注目されている。太陽電池には、様々な材料を用いたものがあるが、シリコンをベースとしたものが主流である。シリコン太陽電池には、結晶型と薄膜型がある。シリコン原料は、地球上に大量に存在する二酸化シリコンから作らねばならず、多大なコストが掛かる。結晶型のシリコン太陽電池では、アモルファス薄膜シリコン太陽電池の100倍以上のシリコン原料が必要であり、原料コストの面で薄膜型が有利である。しかし、

アモルファス薄膜太陽電池の太陽光から電力への変換効率は、結晶型の半分程度しかないので、より吸収波長域の広い微結晶シリコン膜と積層させて変換効率を高めたタンデム型の薄膜太陽電池開発が必要となっている。微結晶薄膜の吸収率はアモルファス膜のものより低く、それらの膜厚は、アモルファス膜が $0.3 \mu\text{m}$ 程度なのに対して、微結晶膜で $2 \mu\text{m}$ 程度が必要となる。したがって、タンデム型シリコン薄膜太陽電池の生産には、微結晶シリコン膜の高速で高品質な成膜技術が必要である。そのような成膜に適したものとして、超高周波 (VHF) のプラズマ CVD 法が用いられている。60 MHz 程度の VHF 電力を平行平板電極 (間隔 10 mm 程度) 間に向け、ガス圧数 Torr 程度でプラズマを生成すると、電子が電極間に閉じ込められることで高電子密度・低電子温度が得られ、高電子密度であることが高速成膜に、低電子温度が高品質成膜に有利に働くと考えられている。しかし、数 Torr のガス圧下での放電プラズマの計測は簡単なものではなく、VHF プラズマの特性は十分に解明されていないのが現状である。本研究では、プラズマに擾乱を与えることなく局所的な電子密度と電子温度を高い空間分解能と時間分解能で測定可能で、しかも測定結果の解釈に曖昧さのないレーザートムソン散乱法に注目し、これを VHF プラズマの計測法として開発した。VHF プラズマ計測に必要な条件を明らかにしてトムソン散乱の有効性を確認した上で、様々な放電条件下での測定を実行し、VHF プラズマの特性を調べた。また、計算機シミュレーションの結果と実験結果を比較することで、計算機シミュレーションが VHF プラズマの有効な研究手段となることを検証した。

本論文は、これらの研究をまとめたものであり、5 章より構成される。

第 1 章では、本研究の背景と目的、および本論文の構成について述べた。

第 2 章では、まずタンデム型シリコン薄膜太陽電池の研究の現状についてまとめ、そこで求められる VHF プラズマの特性について整理した。また、VHF プラズマの動作原理やプラズマ生成法についてまとめた。次に、VHF プラズマの計測法として、レーザートムソン散乱法の原理と測定方法について述べた。もう一つの計測法として、プローブ法についても、測定の原理と測定の方法について記述した。さらに、VHF プラズマの計算機シミュレーションに用いた、ペガサスソフトウェア社のハイブリッドコードについて記述した。

第 3 章では、レーザートムソン散乱法の VHF プラズマ計測法としての開発について記述した。VHF プラズマは、最初の計測のターゲットとして、比較的高い電子密度の得られるアルゴンガスを動作ガスとして生成した。ところが、アルゴン準安定原子のプローブレザー光による二光子光電離が原因で、散乱スペクトルのレーザー波長近くに異常な信号が観測された。この異常信号のパワー密度依存性を調べることで、異常信号がトムソン散乱計測の妨げとなるレーザーパワー密度の閾値が $4 \times 10^{13} \text{ W/m}^2$ であることを初めて示した。さらに、円柱レンズを収光レンズとして用いれば、この閾値より低いパワー密度が達成され、信号レベルも通常用いられる平凸レンズのときの 30%程度が確保されることを示した。この条件下でレーザートムソン散乱法とプローブ法による測定結果の比較を行った。測定対象は、100 mTorr とプローブ法で問題ないアルゴンガス圧での VHF プラズマとした。結果は、電子密度ではレーザートムソン散乱による測定値がプローブ法によるものより約 10%高く、電子温度はレーザートムソン散乱による測定値がプローブ法によるものより約 1.7 倍低くなった。これらの傾向は、低気圧放電プラズマでの両計測法の比較での報告と一致するものであり、この結果は、ここで開発したレーザートムソン散乱法の VHF プラズマ計測法としての有用性を支持するものである。

第 4 章では、レーザートムソン散乱法を用いて VHF プラズマの特性を調べた。まず、アルゴンガス圧 100 mTorr において、パワーを 20 W から 80 W で変化させたときの平衡給電法と片側接地給電法の比較を行った。その結果、電子温度は 2 eV 程度において両者で差がないのに対し、

電子密度は平衡給電法による値が片側接地給電法によるものより 40 % 程度高くなった。次に、ガス圧を 100~1000 mTorr の範囲で変化させて平衡給電法と片側接地給電法の比較を行った。平衡給電法での電子密度は、ガス圧が 100 mTorr から 800 mTorr まで増加するにつれて増加し、それ以上の 1 Torr までは飽和傾向を示した。この傾向は、プラズマ高周波加熱のガス圧力への依存性と矛盾しないものであった。これに対して、片側接地給電法では、電子密度がガス圧と共に直線的に増加し、800 mTorr 以上では平衡給電法での値を超えるものとなった。放電を観察したところ、片側接地給電では 200 mTorr 以上のガス圧において、電極側面にある給電点の近くにおいて異常放電が形成されていることが確認された。これらの結果から、VHF プラズマ生成における平衡給電法の有用性が確認された。平衡給電法でのガス圧依存性については、レーザートムソン散乱法とプローブ法の比較も行った。ガス圧の 100~1000 mTorr の範囲での変化に対し、プローブによる電子密度の測定値は、ガス圧と共に減少する傾向を示し、レーザートムソン散乱法による結果とは異なるものとなった。このことは、プローブ計測が高ガス圧領域で使えないことの一つの検証結果を与えるものである。ペガサスソフトのハイブリッドコードを用いたシミュレーション結果と、レーザートムソン散乱法による測定結果との比較も行った。その結果、電子密度、電子温度とも、両者はファクターではことなるものの、オーダー的には良い一致を示した。すなわち、計算機シミュレーションも VHF プラズマ研究の有効な手段となることが検証された。

第 5 章で結論であり、本研究で得られた成果をまとめるとともに、今後の発展について述べた。

論文審査の結果の要旨

本論文は、VHF アルゴンプラズマの計測法としてレーザートムソン散乱法を確立すると共に、様々な条件下での VHF プラズマの電子密度、電子温度の測定を通じて同プラズマの特性を明らかにしたもので、プラズマ工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。