

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	ZHANG Pengfei
論文題目	Development of 320GHz Interferometer System for Electron Density Measurement in Heliotron J (ヘリオトロン J における電子密度計測のための 320GHz 干渉計システムの開発)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、磁場閉じ込め核融合プラズマの閉じ込め・輸送の理解に向けた粒子輸送解析のため、高密度領域において電子密度分布を計測することを目的とし、これまでほとんど用いられてこなかったサブミリ波周波数帯域において、多チャンネル 320GHz サブミリ波干渉計の設計・構築、レトロレフレクタアレイの特性、及び、プラズマ実験への適用をまとめたものであり、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論である。将来のエネルギー源としての核融合炉開発の重要性を示すとともに、プラズマの粒子輸送を調べるためには電子密度分布の測定と解析が不可欠であることを述べ、核融合プラズマの電子密度測定に用いられている干渉計の開発に関する先行研究を紹介するとともに、本研究の目的と意義を述べている。300GHz のサブミリ波周波数帯域における干渉計の開発は十分に行われておらず、干渉計の可能性を拡げることが期待される。</p> <p>第2章では、プラズマでの電子密度計測のための干渉計の原理を述べている。プラズマ中を伝搬する電磁波の屈折率の変化により、プローブビームとリファレンスビーム間の位相差から線積分電子密度が求められる。核融合装置で用いられるマイケルソン干渉計とマッハツェンダー干渉計の原理を示し、ヘテロダイン検波によって電子密度を計測するシステムについて説明している。</p> <p>第3章では、Heliotron J 装置における磁場配位、加熱装置、計測装置の概要を説明している。Heliotron J では、加熱システムとして電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) 及び中性粒子ビーム入射 (NBI)、プラズマ密度を制御する燃料供給法として超音速分子ビーム入射 (SMBI)、高強度ガスパフ (HIGP)、ペレット入射が利用されており、これらを用いた粒子制御手法について説明している。</p> <p>第4章では、Heliotron J での新しい 320 GHz 干渉計システム構成の詳細概要及び開発結果を説明している。これまで利用されている 132GHz マイクロ波干渉計は低いカットオフ密度のため $3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ を超える密度では計測が困難であり、また、波長 $337 \mu \text{m}$ の HCN レーザー干渉計は高密度プラズマでの電子密度を計測することが可能なものの保守・運転が容易ではない。これら従来の干渉計の問題点を解決するために、これまでほとんど用いられてこなかった 300GHz 帯のサブミリ波に注目し、準光学伝送系を用いた単チャンネル干渉計の設計・構築を進めた。2つの 320 GHz 50 mW 固体発振器、準光学ミラー、オーバーサイズ円形導波管、ビームスプリッター、レトロリフレクタ、シングルエンド検出器を用いてマイケルソン型干渉計を設計した。コンパクトで保守が容易なシステムとし、ヒルベルト変換を用いて瞬時位相を求めることで時間分解能 $1 \mu \text{s}$ 以下の高時間分解能を達成し、数 100kHz 帯の揺動計測を可能と</p>			

した。単チャンネル干渉計でのプラズマ計測が可能であることを示した後、多チャンネル干渉計へ改良している。準光学凹面ミラーと非軸放物（OAP）ミラーを用いることにより、伝送効率 87 % の高効率伝送が可能となり、多チャンネルのために必要なシートビームの生成を行うことに成功した。

第 5 章では、プローブビームの反射に用いるレトロリフレクタアレイの特性について述べている。レトロリフレクタの集合体としてアレイを形成し、マイケルソン型干渉計での動作について実験的に調べた。製作したレトロリフレクタは核融合実験装置のような限られた真空容器内に設置することが可能であるものの、アレイの空間サイズがビーム波長と同程度であり、反射において回折の効果が発生する。その反射特性についてサブミリ波イメージングカメラを用いて実験的に調べ、回折効果によって反射ビームの方向が入射ビームと異なることや、高次成分の回折が発生するものの、0 次成分の反射角は小さく、また、高次成分に含まれるビーム成分は小さいことから、レトロリフレクタとして有効に動作することを明らかにした。回折を含めた理論解析との比較も行い、実験結果が理論と一致することも示した。解析検出器の前に集束レンズを導入することで、ビームの質と強度を改善し、回折効果によるビームの変位を補償できることを示した。

第 6 章では、構築した多チャンネル 320 GHz サブミリ波干渉計を Heliotron J 装置に適用し、電子密度を計測した結果について述べている。Heliotron J 装置の強磁場中で安定に動作することを確認し、ECH プラズマ及び NBI プラズマでの電子密度の時間発展の計測に成功した。低密度 ECH プラズマで得られた電子密度は従来のマイクロ波干渉計で得られた結果と良く一致した。HIGP やペレット入射によって生成された高密度領域の NBI プラズマでは、電子密度が $3\text{-}4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ に増加してゆく過程を計測することができた。また、NBI プラズマにおいて高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性に伴う 50~300kHz の密度揺動を観測した。新しい光学伝送系と非軸放物ミラーにより、シートビームを生成し、磁気軸を通る中心チャンネルと最外殻磁気面に近い周辺チャンネルの 2 チャンネルでの電子密度計測に成功した。

第 7 章は総括であり、本論文で得られた成果について要約している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、磁場閉じ込め核融合プラズマの閉じ込め・輸送の理解に向けた粒子輸送解析のため、高密度領域において電子密度分布を計測することを目的とし、これまでほとんど用いられてこなかったサブミリ波周波数帯域において、多チャンネル 320GHz サブミリ波干渉計の設計・構築、レトロフレクタアレイの特性、及び、プラズマ実験への適用をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 2つの 320 GHz 50 mW 固体発振器、準光学ミラー、オーバーサイズ円形導波管、ビームスプリッタ、レトロフレクタ、シングルエンド検出器を用いてマイケルソン型干渉計を設計した。コンパクトで保守が容易なシステムとし、ヒルベルト変換を用いて瞬時位相を求めることで時間分解能 $1 \mu\text{s}$ 以下の高時間分解能を達成し揺動計測を可能とした。

(2) 単チャンネルでの伝送系・検出系を設計・構築し、動作試験によりプローブビームの位相を求めるための 1 MHz ビート信号を検出した。多チャンネルへ拡張するため、非軸放物 (OAP) ミラーによってシートビームを形成するとともに、オーバーサイズ長集束長凹面ミラーを導入することで 87% の高伝送効率を達成するとともに、伝送ビームのガウスビーム純度を向上させた。

(3) 核融合磁場閉じ込め実験装置に適用可能な、ビーム波長と同程度の空間スケールを持つレトロフレクタアレイを開発した。ビームが回折し離散的なピークが発生するものの、ビームパワーの大部分はシングルピークに含まれ入射方向に反射されることを実験的に明らかにするとともに、理論解析結果と良く一致することを示した。集束レンズを導入することでグレーティング効果を抑制し、干渉計でのプローブビームの検出を可能とした。

(4) 多チャンネル 320GHz 干渉計を Heliotron J 装置に適用し、プラズマ放電において電子密度を計測した。Heliotron J 装置の強磁場中で動作することを確認するとともに、ECH プラズマ及び NBI プラズマでの電子密度の時間発展を計測することに成功した。低密度 ECH プラズマで得られた電子密度は従来のマイクロ波干渉計の結果と良く一致した。従来のマイクロ波干渉計では測定が困難であった高強度ガスパフ (HIGP)、ペレット入射で生成した高密度領域のプラズマの電子密度の計測に成功するとともに、NBI プラズマにおいて高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性に伴う密度揺動を観測した。また、磁気軸と通るチャンネルと周辺を通るチャンネルの 2 チャンネルでの電子密度計測に成功した。

これらの成果は核融合科学・エネルギー科学に大きく貢献するものであり、得られた結果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 5 年 10 月 24 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降