

単一干渉フィルタ・単一検出器による トムソン散乱計測用分光器の開発

学生証番号 47146077 氏名 中井 颯馬
(指導教員 小野 靖 教授)

Key Words: plasma diagnostics, Thomson scattering, spectrometer, interference filter

1. はじめに

トムソン散乱計測は電子によるレーザの散乱光を計測し、電子温度及び電子密度を測定する手法である。特徴として非接触かつ局所計測が可能であるというメリットを持ち、高温・高密度プラズマ計測における信頼性の高さから核融合プラズマ研究において重要な役割を果たしている。

本研究室は磁気リコネクションと呼ばれるプラズマ中のエネルギー変換機構の解明を目的としている。この現象は非常に局所的な加熱を伴い、これを捉えるには高精細な計測が必要となる。トムソン散乱計測は計測点増設に制約が少なくこれに適しているが、適用には未だ課題が残されている。

2. 既存のトムソン散乱計測系の課題

2-1 一般的なトムソン散乱計測系

トムソン散乱計測は、散乱光を生じさせるレーザ系、生じた散乱光を集める集光系、散乱光の波長分布を求める分光計測系、得られたデータを収集・解析する解析系などに分かれる。レーザ系・集光系は1組で計測可能であるが、分光計測系・解析系は計測点ごとに必要となる。これまで本研究室では2次元計測におけるレーザの往復入射の時間差を利用し、必要機器数を1次元分に削減する工夫を行ってきた。しかし、このような取り組みは1次元計測の高精細化には適用することができない。

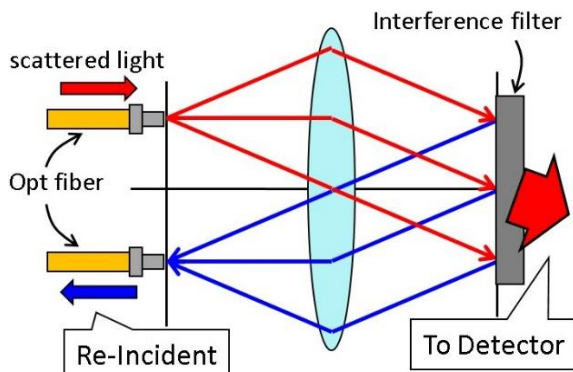


図1. 干渉フィルタへの入射と折り返し

2-2 従来の分光計測

トムソン散乱計測では散乱光のドップラー広がりをつめるために分光計測を行う。従来の分光器では一般に、異なる透過波長帯を持つ複数の干渉（バンドパス）フィルタに対し散乱光を次々反射させ、透過した成分を各チャンネルの検出器で計測する。この方法は高価な光学素子を複数使用し、また、複数フィルタをリレーするために機器が大型化する。磁気リコネクション実験を行うMAST装置では130点のトムソン散乱計測が行われているが、このような計測には多大なコスト、スペースが必要となる。

2-3 本研究の目的

既存のトムソン散乱計測系は計測点数の増設にコストがかかるという課題を残している。また、原因となる分光装置数を削減する工夫もなされているが、これも適用できる環境が限られてしまう。本研究では計測点増加を容易にすべく、低コストかつ省スペースな分光器の開発を行う。

3. 高精細化のための新規分光器開発

分光器の開発にあたり、新たに単一干渉フィルタ分光の提案・実証を行う。提案する手法は従来と比べて部品数が削減でき、これにより先の目的を達成できると考えられる。

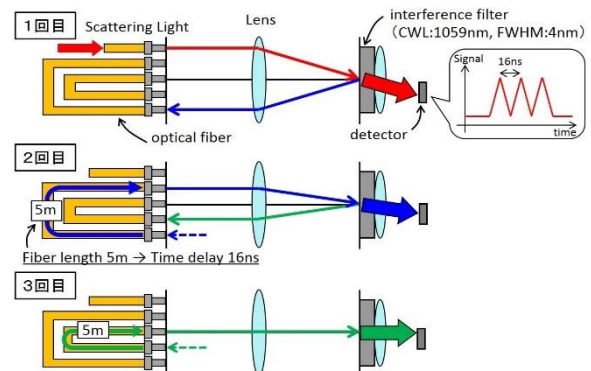


図2. 単一干渉フィルタ分光の仕組み

3-1 単一干渉フィルタ分光

干渉フィルタは入射角に応じて透過波長が短波長側へシフトするという性質を持つ。本研究では散乱光を単一フィルタに様々な角度で入射し、複数の波長帯を切り出す分光手法を提案する。

散乱光はレンズでコリメートされた後、干渉フィルタへと入射される(図1)。この際コリメートレンズの光軸からずらして光を入射すると、透過後の平行光に角度がつく(赤色矢印)。角度のついた平行光を干渉フィルタへと入射することで、入射角に応じてシフトした透過波長帯が検出される。

反射した成分は角度を変えて再びフィルタに入射させるが、光ファイバを用いてこれを実現する。図1に示すように、反射した成分(青色矢印)は再びコリメートレンズへと入射し、集光・結像する。この像は始めの光ファイバ端と等倍であり、別の光ファイバへと再入射することが可能となる。光ファイバを曲げ、その端をこの光学系に設置することで角度を変えた複数回入射が実現される(図2)。

3-2 単一干渉フィルタ分光の波長感度特性

3回入射モデルを作成し、波長感度特性を計測した結果を図3に示す。3回の入射はそれぞれの入射角に応じて波長シフトした透過域を示した。この結果より、単一フィルタによる分光計測の実証に成功したといえる。

図より、3度目の入射時に検出効率が約60%まで低下しており、周回の効率が約77%となっていることが分かる。これは光ファイバへの再入射時に、レンズ収差による光損失が生じたためであると考えられる。そこで、レンズによる性能の向上をシミュレーションにより検証する。

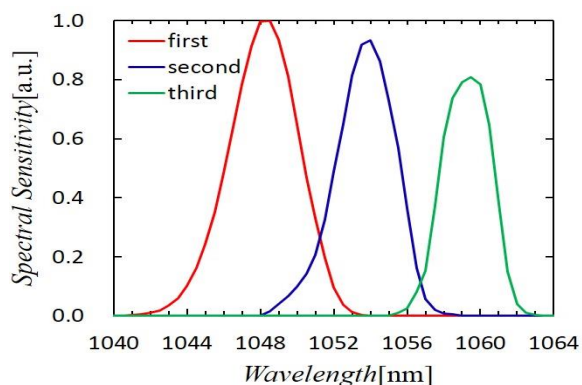


図3. 単一フィルタ分光の波長感度特性

3-3 再入射損失の検討と光学設計の最適化

球面レンズと非球面レンズを用いた際の再入射損失について、実験及びシミュレーションの結果を図4に示す。損失の原因である収差は光軸からのずれに伴って増大することが予想されるが、そ

れぞれの結果はこれに矛盾しない。球面レンズに関して、シミュレーションの結果は実験とよく一致しており、これによりシミュレーションの妥当性が示された。また、非球面レンズを用いた場合、全体で約16%の効率向上が見込まれた。

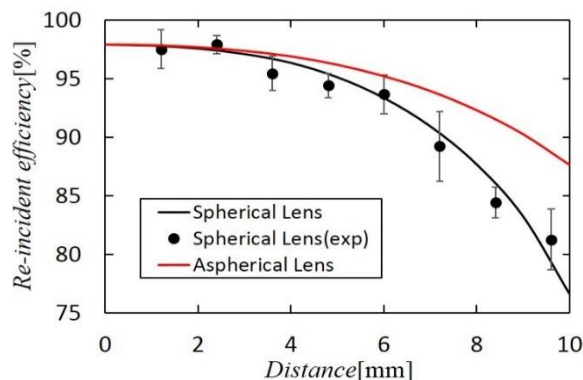


図4. 再入射効率の実験及び計算結果

3-4 単一検出器による複数信号検出

本分光システムでは折り返しの光ファイバ長により時間差をつけることで、複数信号を時間方向に分離することが可能となる。単一検出器による複数信号検出をラマン散乱計測により実証する。

計測の結果を図5に示す。赤線は3信号をガウスフィッティングした結果である。また黒の破線はフィッティング除去後の残余であるが、この標準偏差はch1の信号の1/30程度であった。それぞれの信号は時間方向に分離され、これをフィッティングにより検出できることが示された。

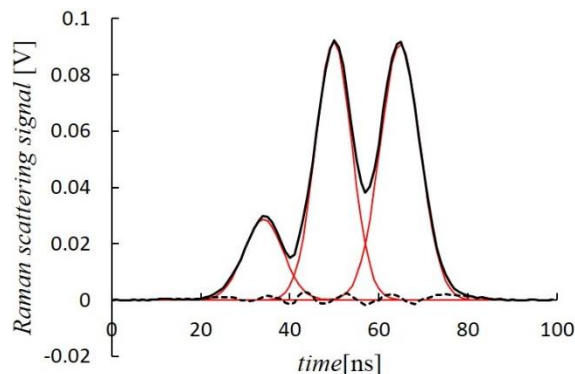


図5. 単一検出器による3chのラマン散乱計測

4. まとめ

信頼度の高いプラズマ計測手法であるトムソン散乱計測について、高精細な計測を実現するための分光器開発を行った。提案した新たな分光方法は低コスト化・小型化を達成できるものであり、これを用いた分光器の性能を実験とシミュレーションにより確認した。結果として提案した分光方法の実証に成功し、高精細なトムソン散乱計測のための分光器の開発に成功した。