

研究課題：JT-60SAにおける先進的電子密度計測に関する開発研究

研究代表者：秋山 毅志（核融合科学研究所）

量研機構担当者：河野康則

研究協力者：今澤良太（量子科学技術研究開発機構）

研究期間：平成 27 年度-29 年度

1. 研究目的・意義

ITERやJT-60SAをはじめとする大型核融合装置では、線平均電子密度計測の目的で、二波長干渉計/偏光計が使用される予定である。線平均電子密度計測は、大型核融合装置の運転に欠かすことができないため、高い精度と信頼性が求められる。そこで本研究では、計測手法が異なる先進的な電子密度計測装置であるディスパージョン干渉計について検討を行い、JT-60SAを大型核融合装置の例として、上記二波長干渉/偏光計と組み合わせて電子密度計測の精度及び信頼性を向上させることを目的とする。そして本研究により、ITERやDEMO炉など今後の核融合装置での先進的電子密度計測の在り方を提案することができる。

2. 研究成果

平成 27、28 年度は、フルスペックとなった JT-60SA のプラズマパラメータを念頭に、波長 1.064 μm の Nd:YAG レーザーを光源としたディスパージョン干渉計の概念設計と、プロトタイプによる分解能評価を行った。29 年度は、実験開始直後で低密度での実験が中心となる時期を念頭に、より密度分解能を高めて実験に寄与することを目的に、CO₂ レーザーを光源とするディスパージョン干渉計の概念設計とプロトタイプによる分解能評価、及び JT-60SA での設置位置での光学架台の設計を行った。CO₂ レーザーは波長が 10.6 μm と Nd:YAG レーザーより 1 桁長く、同じ電子密度でも位相変化が 1 桁大きくなるために、密度分解能を高めることが可能である。

平成 27 年度時点では、光学系の設置位置は JT-60SA 下部ポート直下ピット、伝送路ピット、及び本体室外レーザー室の 3 候補があり、レーザー室を除いては設置できる光学系サイズ、及び設置できる機器サイズに制限があった。そのため、光源は冷却水チラーが不要な小型空冷式が望ましかった。一方で小型化に伴って出力も減少し、ディスパージョン干渉計で SN 比を決める重要な要素である非線形素子による 2 倍高調波の発生量も低下する問題がある。そこで、高効率非線形光学結晶 PPMgSLT の利用を検討し、結晶長を 30 mm とすることで、小型で冷却水が不要な出力 1 W の CrystaLaser 社の Nd:YAG レーザーでも、計測に十分な 2 倍高調波が得られることを示した。28 年度には前年度の設計に基づき、図 1 に示す小規模な光学系で試験を実施した。密度分解能を決めるのは気流の影響と予想されるゼロ点ドリフトであり、JT-60SA の放電時間 100 秒間では $\pm 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ であることを示した。これは参考文献[1]に示された電子密度計測の要求性能（線平均電子密度の 1%: $0.42\text{-}0.81 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、時間分解能 10 ms）に対し、ドリフト成分の方が 2 倍程度の大きくなっている。計測の時定数は 100 μs であり、十分な尤度を持って要求を満たしている。

平成 29 年度は、JT-60SA グループと前年度までに得られた成果について議論を行うと共に、実験初期の比較的低密度で利用することを目的に、CO₂ レーザーディスパージョン干渉計の検討を開始した。LHD で原理実証を行い、高い密度分解能を達成した CO₂ レーザーディスパージョン干渉計は、水冷が必要な放電励起型レーザーを用いていた。平成 29 年度には、二波長干渉計光学系との干渉を避けるため、ディスパージョン干渉計は下部ポート直下ピット内に設置することになった

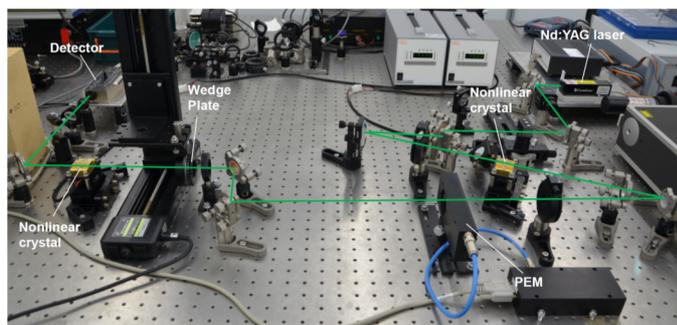


図 1：小型 Nd:YAG レーザーを光源とするディスパージョン干渉計の試験光学系

ため、小型で空冷のレーザーが必須となった。これまで、出力・位相安定性の観点から核融合プラズマ干渉計に取って空冷レーザーを利用した例は無かったため、図 2 に示す光学系で分解能の試験を実施した。小型空冷レーザーとして Access 社の Merit-G シリーズ (2 W) を使い、従来のディスパージョン干渉計光学系を利用してゼロ点ドリフトやノイズ成分を検証した。図 3 が位相及び線平均電子密度のゼロ点ドリ

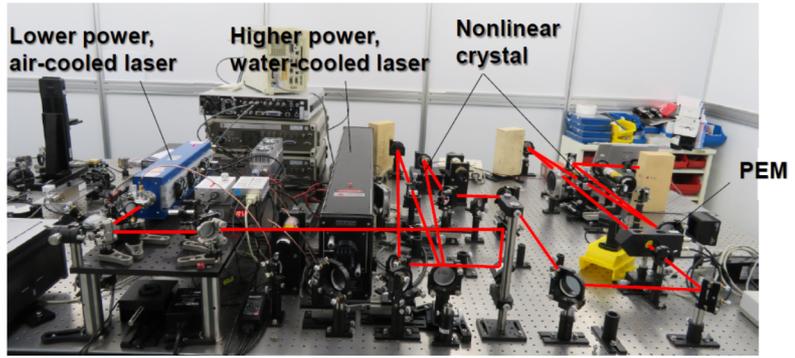
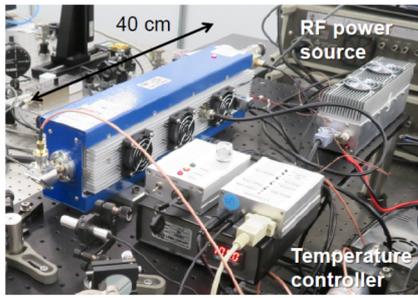


図 2：小型 CO₂ レーザーを光源とするディスペーション干渉計の試験光学系

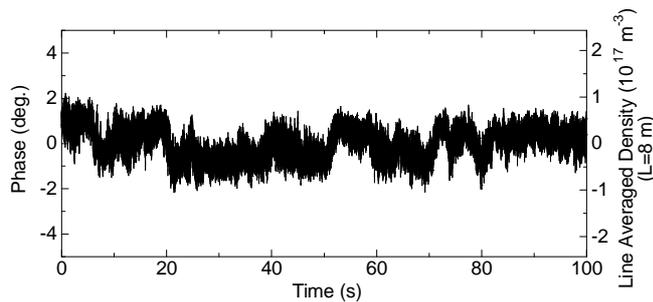


図 3：小型 CO₂ レーザーディスペーション干渉計のゼロ点ドリフト

フトであり、100 秒間で $\pm 9.7 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ が得られた。これは上記の要求性能に対して 1 桁程度ドリフト成分が低く、 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度の低密度プラズマにおいても 1%の密度分解能が期待できる。また、時定数も 100 μs と十分な応答性である。以上の結果より、小型空冷 CO₂ レーザーであっても、JT-60SA での密度計測の要求を満たす安定性を持つことが確認できた。そこで、本小型レーザーを用いた光学系設計を行い、必要な光学系架台サイズを検討した。図 4 にその光学系を示す。下部ポート直下ピットの実際のサイズも現地調査し、ピット内に納

まるサイズの光学系が設計できることを示した。

3. まとめ

JT-60SA の線平均電子密度計測器として、ディスペーション干渉計の設計、及び小規模な光学系で性能評価を行った。JT-60SA の実験が進捗し、密度が増えるに従い、光源レーザーを $10.6 \mu\text{m}$ から $1.064 \mu\text{m}$ へ短波長化する。いずれの波長でも、プロトタイプで概ね電子密度の要求性能を満たすことを示し、設置予定ピット内に納まる小型の光学系を設計した。

4. 今後の課題・予定

CO₂ レーザーディスペーション干渉計の試験で用いた非線形光学結晶は、従来と同じ AgGaSe₂ であり、真空窓等でのレーザーパワー損失を考慮すると、JT-60SA では 2 倍高調波強度が不足する

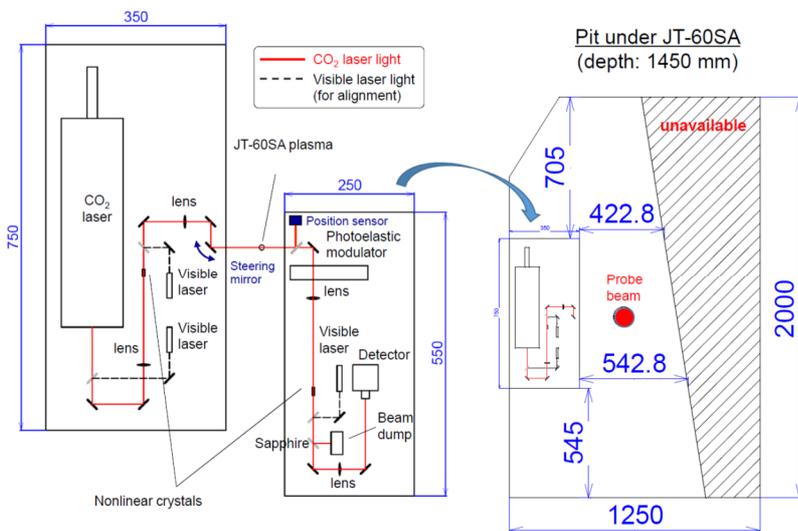


図 4：JT-60SA 下部ポート直下ピットに設置する小型 CO₂ レーザーディスペーション干渉計光学系

可能性がある。そのため、二倍高調波発生効率が 1 桁程度高い非線形光学結晶 OP-GaAs に入れ替え、損失があっても SN を確保する。その場合の二倍高調波発生効率評価、及び受光信号強度評価を行う予定である。また、JT-60SA での全光路長は約 40 m であり、今回の試験と大きく異なる。特に短波長の場合は空気の密度、水蒸気量、温度によって分散が変化するため、長距離伝送時のゼロ点変動が大きくなる可能性がある。そのため、光路長を実環境と同程度に伸ばし、光軸帰還制御試験も含めて長距離伝送時の分解能の劣化の有無を調べる予定である。

参考文献

[1] H. Sasao *et. al.*, JINST 11 C02082 (2016).

全研究期間中の成果リスト

【会議論文（査読付）】

1. T. Akiyama *et. al.*, "Design of compact dispersion interferometer with a high efficiency nonlinear crystal and a low power CO₂ laser", Journal of Instrumentation 12 C12028 (2017).

【口頭発表】

1. T. Akiyama *et. al.*, "Nd:YAG laser dispersion interferometer on JT-60SA", Satellite Tokamak Project, Integrated Project Team, 5th Research Coordination Meeting (RCM-5), 18 May 2016, Naka.
2. T. Akiyama *et. al.*, "Design of compact dispersion interferometer with a high efficiency nonlinear crystal and a small power CO₂ laser", 18th Laser Aided Plasma Diagnostics, 24-28 September 2017, Prague, Czech.