

光渦を用いた新しい電子サイクロトロン加熱に向けて

辻村 亨
核融合科学研究所

2022 年 3 月

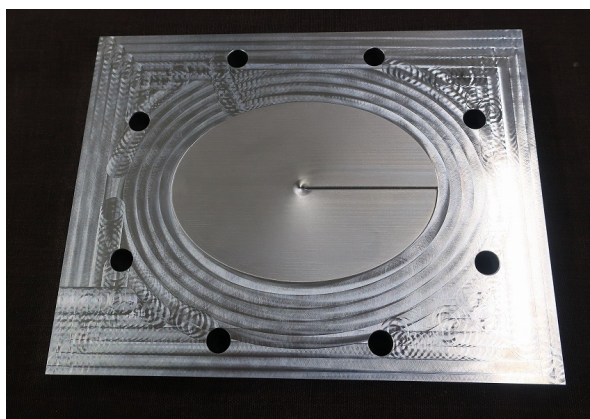
光渦を用いた新しい電子サイクロトロン加熱を実験的に検証するために、2021 年度はミリ波帯光渦伝送系を構築してきた。ジャイロトロンからのミリ波を光渦に変換するためのスパイラル位相ミラーを開発し、反射特性を調べた。年度末に高パワー耐性のあるスパイラル位相ミラーを 77 GHz の伝送系に設置する。大型ヘリカル装置 (LHD) の第 24 サイクルに原理実証実験を予定している。

ミリ波は磁場閉じ込め核融合プラズマの加熱、電流駆動、計測などに広く利用されている。スピン角運動量を表す波の偏波はそれぞれの目的に応じて適切に制御されている。しかし、軌道角運動量を含む螺旋状の波面を持つミリ波は、磁場中の伝播特性の理解が不十分なため、このような目的には使用されてこなかった。ところが最近、磁化プラズマ中の螺旋波面を持つ電子サイクロトロン波の伝播特性が理論的に研究され、その伝播特性は従来の平面波面を持つ波とは異なることが予測されている [1]。また伝播だけでなく、電子の螺旋運動による螺旋波面を持つ電磁波の発生も理論的に予測され、実験的に実証されている [2]。

これらの研究結果は、螺旋波面を持つミリ波を将来の核融合プラズマ実験に応用する動機付けとなっている。これらの実験では、ジャイロトロン発振器を用いることにより、ミリ波のパワーが定常状態で 1 MW のオーダーに達するため、ミリ波帯においていわゆる「光渦」に変換させる光学素子には高パワー耐性が要求される。光渦に変換させる光学素子としては、スパイラル位相プレート、q プレート、ホログラムなど様々なものが既に開発されており、最近では、高出力可視光レーザーシステムで適用可能な軸外しスパイラル位相ミラーが開発されている [3]。本研究では、ミリ波帯の光渦を生成するための軸外しスパイラル位相ミラーを開発した [4]。

図に製作したスパイラル位相ミラーを示す。入射ビームにはガウシアンビームのような平面的な波面を想定し、斜め入射させる。入射ビームを所望のトポロジカルチャージ L を持つ光渦に変換するためには $0-2\pi$ 位相不連続高さを適切に設定する。反射の際の伝播距離の違いによる位相差は Bragg 様な反射条件を満たす。ミリ波帯では機械加工により、 $0-2\pi$ 位相不連続高さが波長のオーダーである軸外しスパイラル位相ミラーを製作することが可能である。このため、図に示すように、連続的に表面高さが変化するミラーをボールエンドミルを用いた機械加工により製作した。

製作した $L = -3$ から 3 までの各スパイラル位相ミラーについて、低パワー試験による反射特性を調べたところ、ドーナツ状の強度分布が観測され、 $|L|$ が大きくなるにつれて大半径が大きくなった。各反射波のトポロジカルチャージを確認するために、簡易な干渉系を構成したところ、各 L に対応した干渉強度分布が観測された。また Gerchberg-Saxton アルゴリズムに基づく位相回復



製作したスパイラル位相ミラー

法 [5, 6] を位相特異点を持つ光渦ビームに対して適用した結果、各 L のスパイラル位相ミラーに対応したトポロジカルチャージを持つ反射波の位相分布を確認した。

光渦を用いた新しい電子サイクロトロン加熱を実証するためのプラットフォームとして、LHD の 77 GHz 伝送系とヘリオトロン J 装置の 70 GHz 伝送系での実験を計画した。現在、図に示すスパイラル位相ミラーを電子サイクロトロン加熱用のミリ波伝送系のマイターバンドに取り付けるミリ波帯光渦伝送系を構築している。従来の実験と新しい光渦を用いた実験を両立するために、バイパス導波管を設置する。

- [1] T. I. Tsujimura and S. Kubo, Phys. Plasmas **28**, 012502 (2021).
- [2] M. Katoh *et al.*, Sci. Rep. **7**, 6130 (2017).
- [3] A. Longman *et al.*, Opt. Lett. **45**, 2187 (2020).
- [4] T. I. Tsujimura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. under review.
- [5] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, Optik **35**, 237 (1972).
- [6] A. Sawant *et al.*, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. **7**, 164 (2017).