

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630108

研究課題名(和文) 高速キャピラリー-Zピンチ放電を用いた水素様窒素再結合軟X線レーザーの実現

研究課題名(英文) Realization of hydrogen-like nitrogen recombination soft x-ray laser pumped by fast capillary discharge

研究代表者

堀田 栄喜 (Hotta, Eiki)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：70114890

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：キャピラリー放電型軟X線レーザーの研究ではネオン様アルゴン電子衝突励起軟X線レーザー(波長46.9 nm)が実現された。さらなる短波長化を目的に、水素様窒素再結合レーザー(波長13.4 nm)が提案されたが、未だ実現されていない。本研究では、ピンチプラズマの膨張過程でも凹型電子密度分布を得るよう、軸方向磁界を印加した。その結果、13.4 nm付近の出力増大を確認したが、レーザー発振には至らなかった。その原因は、大電流放電において、プラズマとキャピラリーとの相互作用による内壁のアブレーションが原因となって最大ピンチ時のプラズマ温度が低下し、水素様窒素が必要な密度に達していないためであると推定された。

研究成果の概要(英文)：In the study on capillary discharge soft x-ray laser, neon-like argon electron collision excitation soft x-ray laser at 46.9 nm has been already realized. In order to shorten the laser wavelength, hydrogen-like nitrogen recombination soft x-ray laser at 13.4 nm was proposed, however, it does not realized yet. In this research, applying uniform axial magnetic field, increased radiation around 13.4 nm was observed by generation of concave electron density distribution on axis, however, lasing could not be realized. The reason why no lasing was observed was estimated as follows: plasma-wall interaction was increased by high current capillary discharge and the ablated material of capillary inner wall prevented the plasma temperature at the maximum pinch from attaining the required value and the resulted hydrogen-like nitrogen ion density was quite less than that required for lasing.

研究分野：工学

キーワード：レーザー キャピラリー放電 パルスパワー 電力変換

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 電子衝突励起軟 X 線レーザは、レーザ生成プラズマあるいはキャピラリー放電プラズマにより発振が確認された。本研究グループでも、アルゴン (Ar) を封入したキャピラリー高速 Z ピンチ放電を用い、世界で 2 例目となるネオン (Ne) 様 Ar 電子衝突励起軟 X 線レーザの発振 (波長 46.9 nm) に成功し、引用文献等で公表した。その後、軟 X 線レーザの短波長化を目的に、再結合励起による軟 X 線レーザの研究が世界各所で開始されたが、未だどこも発振に成功していない。当研究グループでも水素 (H) 様窒素 (N) 再結合軟 X 線レーザの研究を開始し、発振が観測されない原因は、i) 放電電流が未だ不十分で、十分な量の H 様 N イオンが得られていないこと、および ii) ピンチプラズマの膨張過程において図 1.1 に示すような軸上で凸型の電子密度分布になってしまうためにレーザが発散してしまうため、であると推測している。

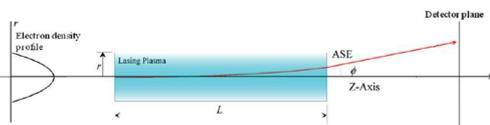


図 1.1 屈折効果

(2) 小型のパルスパワー装置でも、短パルス大電流放電によって高温・高密度プラズマを生成し、これを急速に冷却できれば、理論的には、発振波長 10 nm 程度のキャピラリー放電型再結合軟 X 線レーザの実現が可能である。しかし実際には、国内外のいずれの研究機関においても再結合軟 X 線レーザの発振には未だ成功していない。本研究により、H 様 N 再結合軟 X 線レーザを実現できれば、世界初の成果となる。

(3) 一方、次世代大規模集積回路 (LSI) の技術として 22 nm 以下の線幅が要求されており、これを実現するために波長 13.5 nm の縮小露光用極端紫外 (EUV) 光源の開発が世界的な競争で行われ、照明光学系の計測技術も鋭意、開発されている。本研究による軟 X 線レーザが実現すると、EUV 光源と波長がほぼ同じため、EUV 露光技術の研究開発、特に照明光学系やレジストの研究開発に多大な貢献ができる。さらに、高い光子エネルギー (約 90 eV) および優れた干渉性と高出力 (数 10 MW) を利用することによって、基板材料の直接的な微細加工も可能になる。このように、本研究の成果はナノテクノロジーの基盤を支える技術でもあり、産業界に対しても大きな貢献ができる。

## 2. 研究の目的

窒素放電により H 様 N 再結合軟 X 線レーザの発振条件を明らかにすることを目的とし、以下のことを行う。

(1) 現在まで放電型再結合軟 X 線レーザの発振が観測されていないのは、ピンチプラズマの膨張過程で、軸上で凹型の電子密度分布が維持されず、プラズマによるレーザ光の導波路効果が失われていることが考えられる。そこで、軸上で凹型の電子密度分布を維持するために軸方向磁界を印加し、その効果について検証する。

(2) さらに、現有装置ではキャピラリー放電部の絶縁性能が不足し、放電電圧を電源性能の限界まで上げることができないために、十分な量の高温プラズマが得られていないと考えられるので、大電流化 (放電電流 100 kA) のための絶縁性能の改善を行い、世界初となる利得飽和した H 様 N 再結合軟 X 線レーザの実現を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 現有設備であるパルスパワー電源 (出力用中間水コンデンサ容量: 3 nF, 充電電圧: 500 kV, 直径 3 mm で長さ 10 cm のキャピラリーを使用時の最大出力電流: 70 kA, パルス幅: 70 ns) を用いて、窒素を封入した高速キャピラリー Z ピンチ放電により、H 様 N 再結合軟 X 線レーザの発振実現を目指す。H 様 N 再結合軟 X 線レーザの発振が未だ観測されていないのは、プラズマの再結合が行われる膨張冷却過程において、軸近傍で凹型 (軸上で極小) となる電子密度分布が維持できていない可能性があるため、ピンチプラズマによる光導波路効果を使うために軸方向磁界を印加してプラズマを磁界に凍結し、凹型電子密度分布形状を維持させる手法の有効性を確認する。

(2) 放電部の絶縁性能の改善により高耐電圧化し、100 kA 程度までの放電を可能にする。これにより、比較的高い封入圧力においても高温・高密度プラズマを生成できるようにし、十分な量の多価電離プラズマを得ることにより、利得飽和した H 様 N 再結合軟 X 線レーザの発振実現を目指す。

## 4. 研究成果

(1) Rocca らは Ne 様 Ar 軟 X 線レーザの実験において、150 mT の軸方向磁界を印加することにより、軸上に出力のピークを持つ強度パターンを観測した (引用文献)。これは、磁界印加によりプラズマの最大圧縮時に凹型の電子密度分布が形成され、導波路効果によって軸上にピークを持つ出力が得られたと考えられる。本研究でも同様の効果が得られることを狙って、ソレノイドコイル (コイル内径 200 mm, 長さ 50 mm, 巻き数 300 回) を 3 つ並べてキャピラリー部に設置し、サイリスタスイッチを通してコンデンサ放電を行い、均一な軸方向磁界を印加した。軸方向磁束が保存されること、最大圧縮時にプラズ

マ半径が約 1/10 程度に圧縮されることを考慮し、放電電流を 70 kA としたときプラズマのピンチダイナミクスに大きな影響を与えずに圧縮できる軸方向磁界の最大値は 300 mT 程度と見積もられる。

(2) 窒素ガスの封入圧力 200 mTorr において、初期印加磁束密度をパラメータとしたときの X 線ダイオード (XRD) で計測した放射出力波形を放電電流波形とともに図 4.1 に示す。磁束密度 50 mT において、電流ピーク値を過ぎてから XRD 出力が大きく増大していることがわかる。これは、磁界印加によって凹型電子密度配位が維持され、導波路効果が観測されたものと考えられる。ただし、封入ガス圧力が小さいため、十分な H 様 N イオンが得られず、レーザー発振には至っていない。

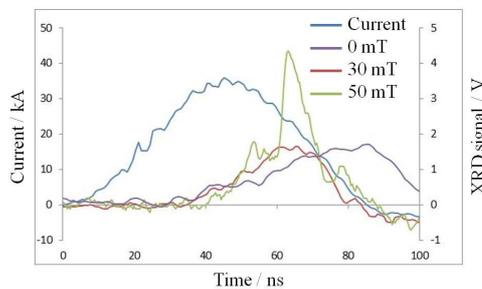


図 4.1 封入ガス圧力 200 mTorr での電流および XRD 出力波形

(3) 窒素ガスの封入圧力 750 mTorr において、初期印加磁束密度をパラメータとしたときの XRD で計測した放射出力波形を放電電流波形とともに図 4.2 に示す。磁束密度 75 mT 以上において、封入ガス圧力 200 mTorr の時と同様に、電流ピーク値を過ぎてから XRD 出力が大きく増大している。しかしながら、この場合においてもレーザー発振は観測されなかった。先行研究 (引用文献) によると、この封入気圧では、かなりの H 様 N が生成されると考えられ、レーザー発振の可能性はあるが、実験では発振には至っていない。この原因について、次項で考察する。

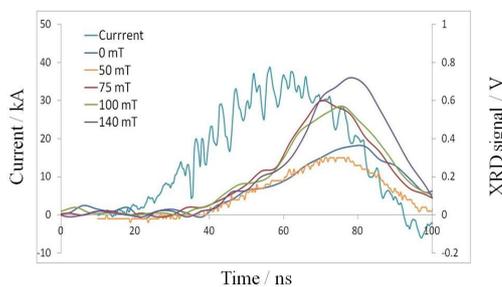
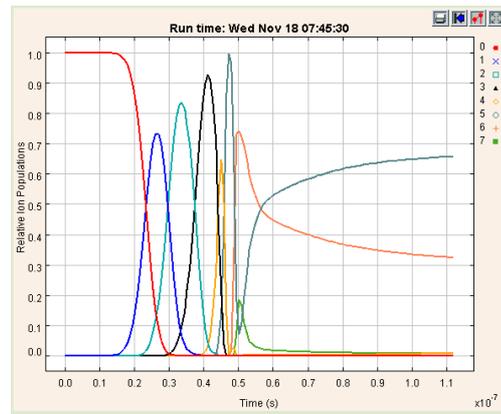
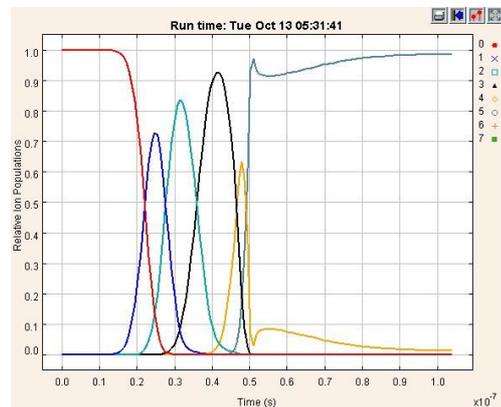


図 4.2 封入ガス圧力 750 mTorr での電流および XRD 出力波形

(3) 大電流キャピラリー放電に関し、海外協力者の Vrba 博士を招聘し、ワークショップを開催した。その中で、H 様 N 再結合軟 X 線レーザーが、他所を含めて未だ実現できていない原因について検討した。Vrba らのシミュレーション結果 (引用文献) によれば、大電流放電によって放電初期からキャピラリー内壁がアブレーションされ、この部分を軸方向電流が流れるようになる。このため、中心部のプラズマを十分圧縮できず、不純物による放射も寄与して、プラズマの温度が十分に上昇しない (必要とされるプラズマ温度は 200 eV 程度)。したがって、十分な量の  $N^{+}$  イオンが生成されず、その結果、膨張過程の再結合フェーズにおいても、レーザー発振に必要な十分な量の H 様 N イオンが得られないため、反転分布が形成されず、結局、H 様 N 再結合レーザー発振が観測されなかったと考えられた。図 4.3 は、三角波電流 (波高値 50 kA, パルス幅 100 ns) を封入ガス圧 4.15 Torr において、内径 3 mm のアルミナキャピラリーに流したときの、アブレーションのある/なしによるイオンフラクションのシミュレーション結果を示している。この図より、アブレーションがあるとレーザー発振に必要な 7 価や 6 価のイオンが全く得られていないことがわかる。



(a) アブレーションなし



(b) アブレーションなし

図 4.3 アブレーションの影響

(4) 大電流放電が可能のように装置放電部の絶縁性能の改善を行ったが、前項に記載したように、キャピラリー内壁のアブレーションが問題となり、H様N再結合レーザーの発振が得られていないものと推定された。今後は、アブレーションに耐性のあるキャピラリー材料についても検討する必要があると考えられる。

<引用文献>

G. Niimi, Y. Hayashi, M. Watanabe, K. Horioka, E. Hotta et al, Observation of multi-pulse soft x-ray lasing in a fast capillary discharge, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.24, 2001, pp.2123-2126

J.J.Rocca, et al, "Demonstration of a Discharge Pumped Table-Top Soft X ray Laser", Phys. Rev. Lett., Vol.73, 1994, p.2192

酒井雄祐, 高速Zピンチ放電による水素様窒素軟X線レーザー実現に向けた研究, 博士論文, 東京工業大学, 博士論文, 2010

J.Hubner, and P.Vrba, A STUDY OF COHERENT RADIATION GENERATED IN AN ABLATIVE CAPILLARY DISCHARGE, Acta Polytechnica, Vol.53, No.2, 2013, pp.79-87

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Eiki Hotta, Yuusuke SAKAI, Yasushi HAYASHI, Gohta NIIMI, Bin HUANG, Qiushi ZHU, Inho SONG, and Masato Watanabe, Extreme Ultraviolet Light Sources and Soft X-Ray Laser Based on Discharge Produced Plasma (INVITED), Proceedings of SPIE, 査読なし, Vol.9524, 2015, pp.2U-1 - 2U-8

Eiki Hotta, Zero-Emission Technologies Based on Discharge Produced Plasma (INVITED), The 6<sup>th</sup> International Symposium of Advanced Energy Science - Towards the Realization of Zero-Emission Energy -, 査読なし, Vol.1, 2015, pp.55-73

[学会発表](計4件)

堀田栄喜, こんなに広いプラズマ応用 - 環境に優しいエネルギー利用から安心・安全社会の実現まで - (特別講演), 第25回電気学会東京支部新潟支所研究発表会, 2015.10.31, 長岡技術科学大学

Eiki Hotta, Yuusuke SAKAI, Yasushi HAYASHI, Gohta NIIMI, Bin HUANG, Qiushi ZHU, Inho SONG, and Masato Watanabe, Extreme Ultraviolet Light

Sources and Soft X-Ray Laser Based on Discharge Produced Plasma (INVITED), International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN2015), 2015.04.14, Singapore

Tadahiro USUBA, Masato Watanabe, and Eiki Hotta, Effects of external axial magnetic field on soft X-ray radiation from capillary discharge hydrogen-like nitrogen plasma, Plasma Conference 2014.11.21, Niigata

Tadahiro USUBA, Masato Watanabe, and Eiki Hotta, Effects of Externally Applied Axial Magnetic Field on Emission Spectra of Capillary Discharge Hydrogen-like Nitrogen Plasma, 5<sup>th</sup> Euro-Asian Pulsed Power Conference, 2014.09.10, Kumamoto

6. 研究組織

(1)研究代表者

堀田 栄喜 (Hotta, Eiki)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：70114890

(2)研究分担者

渡邊 正人 (Watanabe, Masato)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・助教

研究者番号：20251663

(3)連携研究者

堀岡 一彦 (Horioka Kazuhiko)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：10126328

河村 徹 (Kawamura Tohru)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・講師

研究者番号：10370214

(4)研究協力者

酒井 雄祐 (Sakai Yuusuke)

Pavel Vrba (Vrba Pavel)