

大気圧プラズマを用いたプラズマフォトニクスの研究

0412013 上松弘明

米田研究室

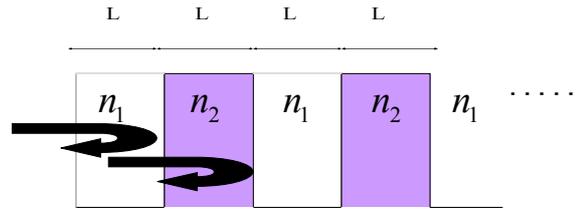
1. はじめに

近年、ペタワットレーザーなど超短パルス高密度レーザーの開発が精力的に進められている。それは、CPA(Chirp Pulse Amplification)というパルス圧縮方法ができたことで、増幅によるレーザー素子の破損を防ぐことができた。しかし、高強度レーザーのCPAにおけるグレーティングでは大きく強いものが求められる。しかし、それでは装置が大きくなる一方であるので、小さくて性能が出せるようなものがほしい。例えば、ファイバグレーティングであれば小さな空間に屈折率の刻みを入れることで性能が発揮される。しかし、これではファイバーのコアに高強度のレーザーを入れなければならないので、ファイバーが壊れてしまう。ということは、破壊されないもので小型であることが課題となる。

そこで、本研究では大気圧中に屈折率差の疎密をつけるために APD という大気圧プラズマデバイスを用いて密度の高い大気圧中にプラズマで疎密を作れないかと考え、プラズマの屈折率を評価するとともにメッシュによってグレーティングが作れるのかを評価した。

2. 原理

・ブラッググレーティング



図のように屈折率の違う媒質を交互に周期的に並べることで波長選択性の高反射なグレーティングができる。

・干渉縞から屈折率を求める

真っ直ぐな横縞であった干渉縞が一方の光路にプラズマを入れると曲がるということは、プラズマで光路長が変わり干渉縞が曲がるということである。式(1)に示すように、どれだけ干渉縞が移動したかという情報がわかれば、電子密度が求められることができ屈折率がわかる。

$$x\lambda = nL - L = (n-1)L = \frac{n_e}{2n_c} L \quad \dots (1)$$

$$\therefore n_e = \frac{2x\lambda n_c}{L}$$

ここで、 x は干渉縞の移動量 (本) である。

・ APD (大気圧プラズマデバイス)

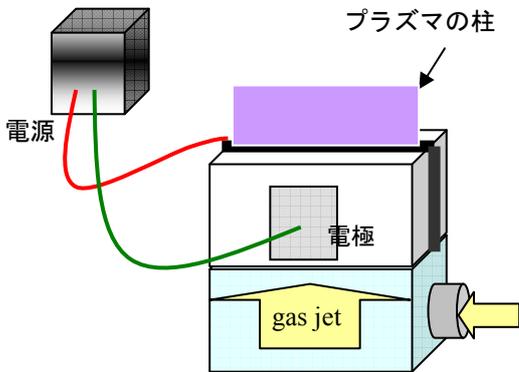


図1 APD の概念図

図のように下から窒素ガスをスリッドを通して噴射させ、その噴射ガスを電極の放電を通してプラズマを作っているが、この APD は通常の放電プラズマ装置のように電圧をかけていると、その中にインピーダンスの低い場所ができてアーク放電をしてしまうのとは違い、単純に電圧をかけているのではなく、できるだけ放電をコントロールして安定させるように、電圧を印加しては止め、そして逆向きの電圧を印加しては止める、ということを 13MHz で繰り返している。こうすることで一気に電流が流れるということを少なくしている。それにより安定なプラズマが得られる。ここで、APD に電圧を印加した時の波形を図2に示す。

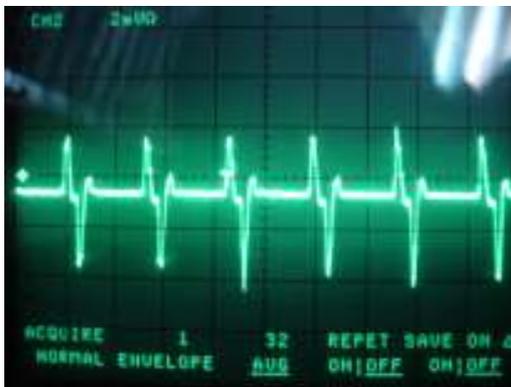


図2 電圧波形

2. 方法

・ 屈折率の評価

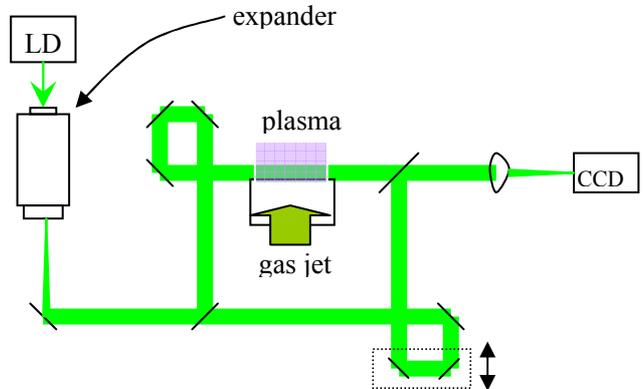


図3 干渉計

光源には波長 532nm の緑色の LD を使用し、その LD から出た光を干渉縞が観測しやすいようにビームエクパンダーを入れて広げ、ビームスプリッターで光路を二つに分ける。分けた光路の片方は可変させられるようにして、さらに、2つに分けた光を同軸上で干渉しあうようにビームスプリッターを置き、レンズで集光し CCD で干渉縞を読み取った。干渉縞は片方の光路を調整することによって得られる。プラズマを噴射させたときの干渉縞の移動量から屈折率を求める。

・ メッシュでグレーティングを作る

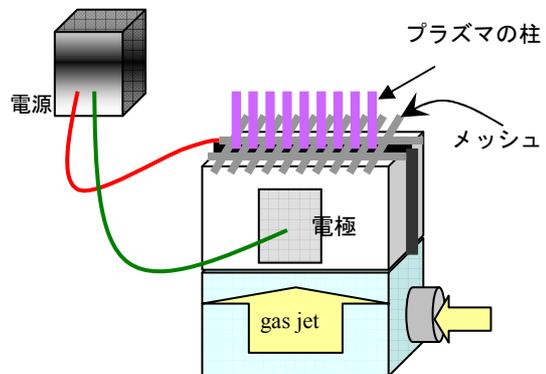


図4 実験概念図

本実験では、大気圧プラズマデバイス

(APD) の安定した放電プラズマを利用し、メッシュ（金網）を組み合わせた。メッシュにプラズマを噴出させ、ピッチから出てくるプラズマと網でプラズマの出てこない空気とで屈折率の疎密を作るというプロセスを行った。図4に概念図を示す。また、ガスの噴出スリッドにメッシュをかけ、ガスの段階で疎密を作ったものをそのままプラズマ化させてみてグレーティングを作るというアプローチも試してみた。

4. 結果

・屈折率の評価

電圧変化とガス流変化で実際に観測できた干渉縞の移動量から電子密度を求めたグラフを図5、図6に示す。また、電圧変化での干渉縞の変化を図5に示す。

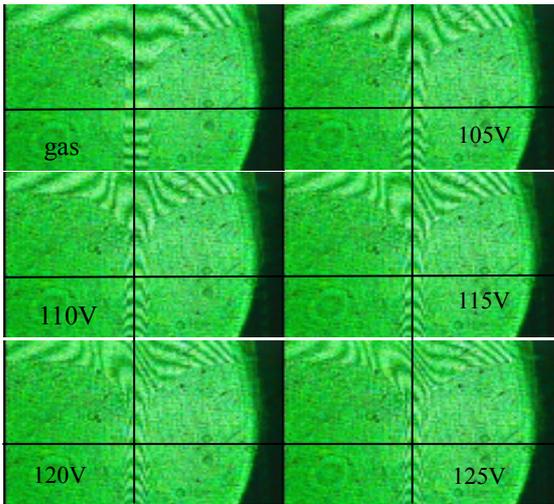


図5 干渉縞変化（電圧変化時）

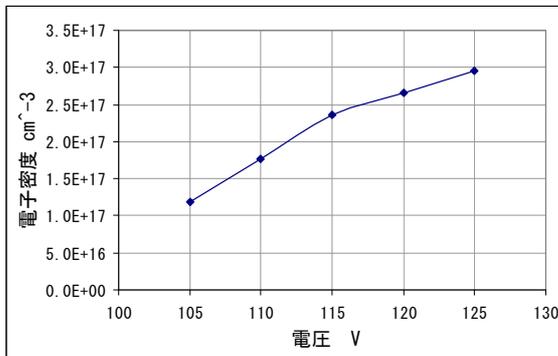


図5 電子密度依存性（電圧変化）

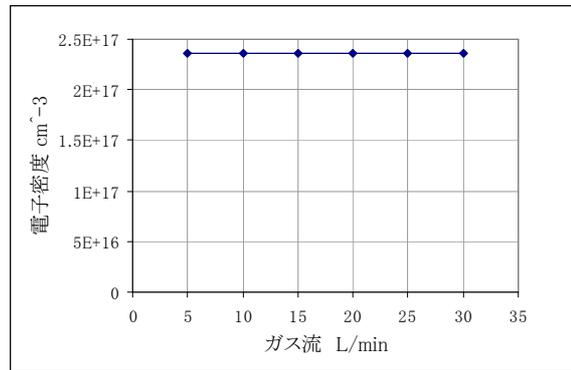


図6 電子密度依存性（ガス流変化）

電圧変化とガス流変化での電子密度依存性は明らかに違うことがわかる。電圧による依存が大きくガス流によってはあまり左右されないことがわかった。

電圧 125V でガス流 30L/min のとき電子密度が最大となったので、そのときのプラズマの屈折率 n_p と境界面での反射率 n を求めてみると、

$$n_p = 1 - \frac{1.8 \times 10^{17}}{2 \times 5.65 \times 10^{21}} = 1 - 0.16 \times 10^{-4}$$

$$\therefore n \approx \frac{2 \times 10^{-4} + 0.16 \times 10^{-4}}{2} = 1.08 \times 10^{-4}$$

となり、反射率が 1.08×10^{-4} であるので、グレーティングとして高い反射率を得るには、 5×10^4 個の格子を周期的に配置すれば良いことがわかった。つまり、 $1 \mu\text{m}$ の格子であれば 5cm のグレーティングができるということである。また、APD の横幅も 5cm であるので、1つのグレーティングが作れることがわかった。

・グレーティング

実際に 200mesh (ピッチ幅 $130\mu\text{m}$) を APD に設置して観測できたプラズマがメッシュを通過している様子を図 7 に示す。また、ガス噴射口にメッシュを設置したときのプラズマの噴出の様子を図 8 に示す。



図 7 プラズマをメッシュに通した場合

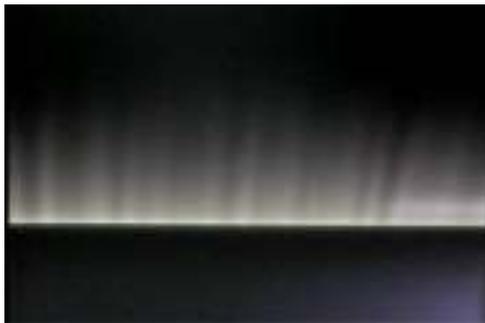


図 8 ガスにメッシュをつけた場合

どちらの場合もプラズマと空気の層が交互に並んでいるのが観測された。これは、APD から出てきたプラズマで疎密を作れたことはもちろんのこと、ガスの時点で疎密を作ってみても、放電部で空気層のところだけに放電が集中し、アーク放電が起こることがなく安定した疎密がプラズマとして噴出してくるという APD の驚くべき性能が発揮された。これにより、ガスの時点で疎密をつけてグレーティングを作ることができるということも可能だということがわかった。

5. 結論

まず、干渉縞からプラズマの屈折率を求めることにより、グレーティングがどれほどのものができるのかということを見積もることができた。

また、実際にメッシュを APD に取り入れることでプラズマ層と空気層を交互に並べることができ、さらに、ガスの段階から疎密を並べてみても APD は機能することがわかった。

6. 今後の展開

グレーティングは境界面がきれいに揃っていて、安定していなければならない。よって、今後はこのプラズマと空気の層を安定にするために、音波の規則的な波の疎密にプラズマを吹き上げてグレーティングを作ること提案する。概念図は図 9 に示す。

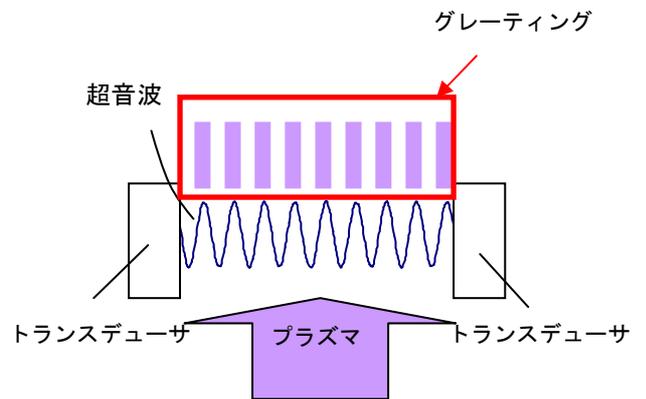


図 9 音波を利用した概念図