

研究ノート

28 GHz ジャイロトロンを用いた大気圧ミリ波放電実験

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 山口敏和、中村友祐、福成雅史
 東京大学大学院 工学系研究科 小紫公也
 筑波大学 プラズマ研究センター 南龍太郎、假家 強、今井 剛

Millimeter-Wave Discharge Experiment in Atmosphere Using a 28 GHz Gyrotron

Toshikazu YAMAGUCHI, Yusuke NAKAMURA, Masafumi FUKUNARI,
 Kimiya KOMURASAKI*, Ryutaro MINAMI**, Tsuyoshi KARIYA** and Tsuyoshi IMAI**

Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo,

*Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

**Plasma Research Center, University of Tsukuba

Abstract

Atmospheric discharge in a high power millimeter-wave beam irradiated from a 28 GHz gyrotron at around 1 GW/m^2 was observed by high-speed framing cameras. Observed filamentary plasma structure was similar to those in the previous experiment in 110 GHz at 30 GW/m^2 but different from those in the other experiment conducted in 170 GHz at 1 GW/m^2 in terms of the direction of filament extension and filament pitch. On the other hand, propagation velocity of the ionization wave was in the same order of the 170 GHz experiment.

Keywords: Millimeter-wave, Atmospheric plasma, Gyrotron, Filamentary plasma, Fast-framing camera.

1. はじめに

高エネルギーミリ波ビームにより誘起される大気圧放電に伴い生じる爆轟波を利用した繰り返しパルス爆轟推進器「マイクロ波ロケット」が提案されている¹⁾。

ここで利用される大気圧ミリ波放電では、条件の違いで様々なフィラメント状のプラズマが形成されることが知られている²⁾。Oda ら³⁾は周波数 170 GHz のジャイロトロンを用いて中強度電界条件 (およそパワー密度 1 GW/m^2 , 電界強度 0.6 MV/m) で大気圧放電の実験を行い、**Fig. 1 左** に示すように直径 40 mm のミリ波ビーム中を、ビーム伝搬方向と逆方向 ($-k$ 方向) に伝播する電離波面と、その後方において同様に $-k$ 方向に伸展するプラズマのフィラメント構造を観測した。

一方で Hidaka ら⁴⁾は、Oda らの実験に比べて空間スケールが 1 桁小さいものの、周波数

110 GHz のジャイロトロンを用いて高強度電界条件 (およそ 30 GW/m^2 , 3 MV/m) で実験を行い、直径 5 mm のミリ波ビーム中に 4 分の 1 波長毎に電界偏波方向 (E 方向) に伸展するフィラメント構造を観測した (**Fig. 1 右**)。また Boeuf ら⁵⁾はこの 4 分の 1 波長毎のフィラメント構造を数値的に再現することに成功している。

本研究では、大気圧ミリ波放電において見られるフィラメント構造の周波数依存性を調べるために、筑波大学で開発された周波数 28 GHz

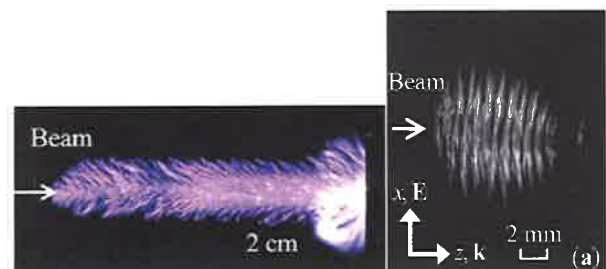


Fig. 1 Discharges in 170 GHz wave at 1 GW/m^2 (left)³⁾ and in 110 GHz wave at 30 GW/m^2 (right)⁴⁾.

(波長 10.7 mm) のジャイロトロン⁶⁾を用い、プラズマからの自発光画像を高速カメラで撮影して放電の構造及び電離波面の伝播速度を調べた。この結果と先に述べた 110 GHz の実験、170 GHz の実験との比較から、周波数によるプラズマ構造の違いについて議論した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 ミリ波射出系

ジャイロトロンから出力されたミリ波は内径 63.5 mm のコルゲート導波管の中を HE_{11} モードで伝送され、石英窓を透過して導波管の端からビームウェスト半径 20.3 mm のガウシアンビームとして照射される。出力は 250 kW から 350 kW まで可変で、放電部でのパワー密度、電界強度はそれぞれおよそ 0.4 GW/m^2 、 0.4 MV/m である。パルス照射時間は 0.1 ms から 1.0 ms まで可変で、パルス照射中の出力は時

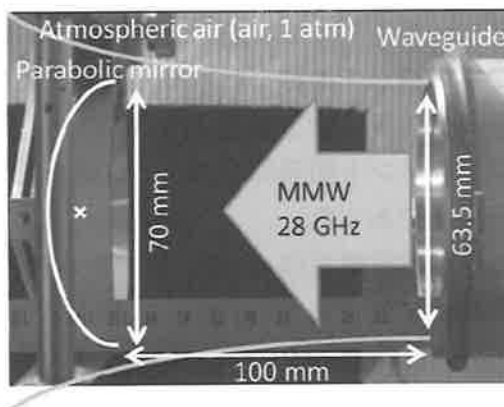


Fig. 2 Millimeter-wave reflector and experimental setup.

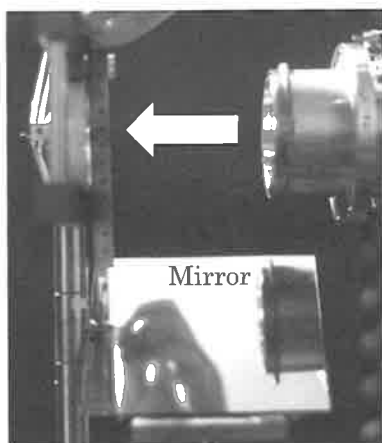


Fig. 3 Schematic of fast-framing imaging.

間に対してほぼ一定である。

放電を開始するにはミリ波ビームを 1 点に集光し空气中に絶縁破壊を起こす必要がある。

Fig. 2 に本研究で使用した集光器と実験系の全体図を示す。集光器は直径 70 mm の放物鏡で、鏡の端と導波管の端の距離を 100 mm に設定した。

2.2 フィラメント構造撮影系

放電フィラメントの自発光画像は高速カメラ (HX-3 および ULTRA cam, nac Image Technology Inc.) によって撮影した。ミリ波は直線偏波していて、ミリ波の電界、磁界ベクトルをそれぞれ E と B で表現すると、 $E-k$ 面と $B-k$ 面から同時に撮影できるように放電部下方に平面鏡を設置した。(Fig. 3)

3. 実験結果及び考察

3.1 ミリ波放電のフィラメント構造

Fig. 4 に放電自発光の長時間露光画像を示す。Fig. 4 の上図に示す $E-k$ 面における露光画像から、細く伸びたプラズマが海綿状の構造を形成していることがわかる。また、下図に示す $B-k$ 面での露光画像からは、スポット状のフィラメント構造が観察された。

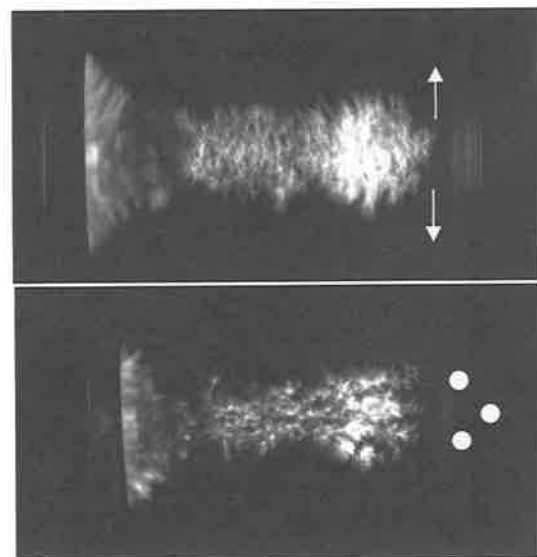


Fig. 4 Long-exposure images of self-emission (top: $E-k$ plane, bottom: $B-k$ plane).

放電自発光を高速カメラ(露光時間 300 ns)にて撮影した画像のうち、代表的な二枚(左図: $E-k$ 面、右図: $B-k$ 面)を Fig. 5 に示す。これらのコマ撮り画像で得られる発光部の時間変化からプラズマの動きを観測した。結果として、Fig. 4 に見られる発光領域は、Fig. 5 にみられる電離波面が放物面鏡の集光部からミリ波の入射方向(図の右方向)に向かって伝播することによって形成されていることが分かった。さらに、Fig. 5 から Fig. 4 の $E-k$ 面においてみられた海綿状の構造は電界方向へと伸びる細いプラズマのフィラメントが折り重なることで形成されていることが分かる。このフィラメント同士の間隔を測定したところ、ミリ波波長の 4 分の 1 に近い値となり、110 GHz の実験で見られた構造と同様のフィラメント構造が 28 GHz 放電においても形成されていると考えられる。

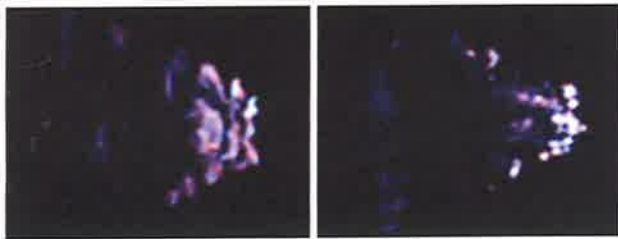


Fig. 5 Fast-framing images of self-emission (exposure time: 300 ns, left: $E-k$ plane, right: $B-k$ plane).

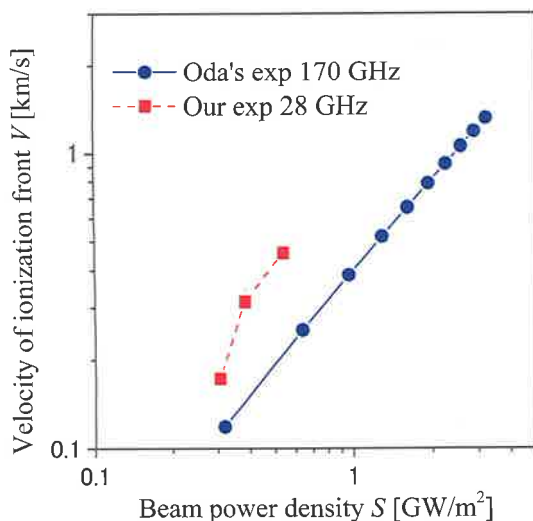


Fig. 6 Propagation velocity of the ionization front in parallel to the beam axis.

3.2 電離波面の伝播速度

高速カメラによる連続コマ撮り画像から、電離波面が $-k$ 方向に伝播する速度を見積もった結果を Fig. 6 に示す。電離波面伝播速度は照射ミリ波ビームの出力と共に上昇し、平均パワー密度 0.4 GW/m^2 で音速程度、 0.55 GW/m^2 でマッハ数 1.5 程度となり、高出力の領域では放電爆轟波を駆動することが可能である。

170 GHz の実験と比較すると、同じパワー密度に対して同程度、あるいは若干高い伝播速度が得られた。110 GHz の実験とはスケール、パワー密度が大きく異なるため比較していない。

4. 結論

28 GHz ジャイロトロンを用いた大気圧ミリ波放電(電界強度およそ 0.4 GW/m^2 , 0.4 MV/m 、ビーム半径 20 mm)を観測し、得られた結果をまとめると以下である。

- (1) ミラーを用いて $E-k$ 面と $B-k$ 面から同時に放電の構造を撮影した結果、 E 方向に伸展するフィラメント構造が観測された。
- (2) フィラメント間隔はおよそミリ波波長の 4 分の 1 であった。
- (3) これら放電構造は、110 GHz、 30 GW/m^2 の実験と相似であり、170 GHz、 1 GW/m^2 の実験とは異なるものであった。
- (4) 電離波面伝播速度は、平均パワー密度 0.4 GW/m^2 で音速程度、 0.4 GW/m^2 でマッハ数 1.5 程度となり、170 GHz の実験と比較して同程度であった。

170 GHz のジャイロトロン実験と比較すると、同程度のパワー密度、スケールでありながらフィラメント構造が異なる。このことから 170 GHz と 28 GHz の間にこのような構造変化が生じる点があり、この点を境に大気圧ミリ波放電を利用した推進器として提案されているマイクロ波ロケットの推進効率も変化することが示唆される。計測されたフィラメント形状

や伝播速度は、今後放電モデルの構築や数値シミュレーション結果の検証に利用できる。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 15H05770 の助成を受けたものです。

References

- 1) T. Nakagawa, Y. Mihara, K. Komurasaki, K. Takahashi, K. Sakamoto, T. Imai, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 41, No. 1 (2004), pp.151-153.
- 2) Y. Nakamura, T. Yamaguchi, K. Komurasaki, T. Shoenherr and H. Koizumi, *Frontier of Applied Plasma Technology*, Vol. 7 (2014), pp. 7-12.
- 3) Y. Oda, K. Komurasaki, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, *Journal of Applied Physics*, 100, 113307 (2006).
- 4) Y. Hidaka, E.M. Choi, I. Mastovsky, M.A. Shapiro, J.R. Sirigiri, and R. J. Temkin, *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008), 035003.
- 5) J. P. Boeuf, B. Chaudhury, and G. Q. Zhu, *Phys. Rev. Lett.*, **104** (2010), 015002.
- 6) T. Kariya, Y. Mitsunaka, T. Imai, T. Saito, Y. Tatematsu, K. Sakamoto, R. Minami, O. Watanabe, T. Numakura, Y. Endo, *Transactions of Fusion Science and Technology* 51, 2T (2007) pp. 417-419.