磁気絶縁型ダイオードの連続動作特性

学生員 千代悦司 (長岡技科大)

正員 升方勝己 (長岡技科大)

正員 八井 浄 (長岡技科大)

Characteristics of Magnetically Insulated Diode in a Multi-Shot Operation
Etsuji Chishiro, Student Member, Katsumi Masugata, Member, Kiyoshi Yatsui, Member
(Laboratory of Beam Technology, Nagaoka University of Technology)

Characteristics of magnetically insulated diode (MID) in a multi-shot operation are evaluated experimentally. MID is operated at $V_d \approx 1.2$ MV. An ion current density (J_i) of 350 A/cm^2 is observed at a first shot when diode gap is 5 mm. J_i decreases with increasing the number of shot and at 7th shot J_i is decreased up to $150 \sim 350 \text{ A/cm}^2$. After 7 shots, the surface of anode was observed and found that it is covered with stuck matter of metallic materials such as Zn, Al, Fe, Cu. By cleaning the surface of anode J_i was recovered to the initial value. From the fact, the decrease of J_i is due to that the anode is covered with the stuck matter, which prevents the growth of anode plasma.

キーワード: 磁気絶縁ダイオード, 大強度パルス軽イオンビーム, 連続動作特性, イオン電流密度低下, 陽極表面付着物

1. まえがき

大強度パルス軽イオンビーム (Intense, Pulse, Light-Ion Beam; LIB) は, 慣性核融合のドライバーとして研究が進められている⁽¹⁾。また, LIB をターゲットに照射することにより容易に高密度プラズマを生成できることから, 近年, 表面改質や薄膜生成などの材料分野^{(2)~(4)}や放射線源などの様々な応用が注目されている。これらの応用には, 繰り返して LIB を発生できる装置の開発が必要となる。

LIB 発生に用いられる磁気絶縁型ダイオード (Magnetically Insulated Diode; MID) は, 陽極表面に多量の電子照射がないためイオン発生効率が高く, また陽極損傷が少ないため陽極を取り替えずに連続動作ができる。しかしながら, 連続動作を行うとイオン電流密度が低下する傾向がある。

本研究では, MID 動作時のイオン電流密度の変化を Biased-Ion Collectors (BIC) を用いて計測し, 連続動作におけるイオン電流密度低下を明らかにした。また, 低下原因として考えられるイオン源の劣化 (表面変質や放電トリの発生), イオン源表面の付着物, 真空ポンプからの逆流油等の影響を調べた。

2. 実験装置

図1(a)は, 本研究に用いたレーストラック型 MID⁽⁵⁾の概略図を示す。MID は, 絶縁磁場発生用の1ターンコイルを兼ねた陰極と, その内部に置かれた陽極からなる。陰極はステンレス製で, 陰極のビーム引き出し側には, 厚さ 2 mm の真ちゅう板を 12 mm 間隔で7本, すだれ状に配置し, 高いビーム透過率を得ている。絶縁磁場は, コンデンサーバンク ($1600 \mu\text{F}$, 5 kV) を用いて陰極に電流を供給することにより発生する。図1(b)は, ビーム引き出し側から見た陽極の正面図を示す。陽極は, アルミ製で平板形状であり, ビーム発生面には, 幅 3 mm, 長さ 70 mm の溝が 13 本あり, イオン源であるポリエチレンが充填されている。陽極は, 切削油や油脂の付着による影響をなくすために, 有機溶剤で洗浄した後, パルスパワー装置に取り付けた。MID は, 長岡技術科学大学設置のパルスパワー発生装置 "ETIGO-II" により駆動した。

イオン電流密度 (J_i) 計測には, 陽極表面から 34 ~ 37 mm 下流に設置した4個のアパーチャーからなる BIC を使用し, 陽極中央付近から引き出されるビームを計測した。BIC には, イオンと並走する中和電子を取り除くためにバイアス電圧 (-1 kV) が印加されている。

図1 (a) MID 概略図, (b) 陽極正面図
Fig.1 (a) Schematic diagram of MID,
(b) Frontal diagram of anode.

図2 ダイオード電圧 (V_d) とイオン電流密度 (J_i) 波形, (a) 第1ショット, (b) 第7ショット
Fig. 2 Wave forms of diode voltage (V_d) and ion current density (J_i), where J_i was measured at $z=34-37$ mm downstream from the anode. (a) 1st shot, (b) 7th shot.

3. 連続動作特性

MID を連続動作した場合のイオン電流密度の変化を評価した。実験は、ギャップ長 (d) をパラメータとして行い、絶縁磁場 (B) の臨界絶縁磁場⁽⁶⁾ (B_c) に対する比を (1.1 ~ 1.2) とした。動作手順は、真空ポンプ作動開始から 90 分後に 1 回目のダイオード動作を行い、その後 15 分間隔でダイオード動作を繰り返した。動作時の真空圧は $(1 \sim 2) \times 10^{-2}$ Pa である。

図2は、 $d = 6.5$ mm の場合の典型的な動作波形を示す。ダイオード電圧 (V_d) は、約 100 kV のプリパルスと有し、プリパルスの立ち上がりから ≈ 170 ns 後に主パルスが立ち上がる。 J_i のピーク値は、第1ショットで 330 A/cm² であり、動作を繰り返した第7ショットでは、 150 A/cm² まで低下した。このときの V_d の立ち上がりから J_i ピークまでの遅れ時間 (t_d) は、第1ショットで 127 ns、第7ショットで 150 ns となり、連続動作を行うと t_d が増加する。

図3は、動作回数に対する J_i の依存性を示す。実験は、各 d 条件で 8 ~ 11 回行った。図は、各 d で得られた J_i のピーク値の平均とピーク値のバラツキ (標準偏差) を表す。図から、第1ショットでは、 J_i は d が短いほど大きく、 $d = 5.0$ mm の場合 350 A/cm² の平均イオン電流密度が得られている。 J_i はショット数の増加とともに減少し、 $d = 5.0$ mm の第7ショットでは 150 A/cm² となる。 J_i の減少率は d が短いほど大きく、第7ショットでは、 d による差はほとんど見られない。

図4は、動作回数に対する t_d の変化を示す。すべての d において t_d は、ショット数の増加とともに長くなる傾向がある。

図3 J_i の動作回数に対する依存性
Fig. 3 Dependence of J_i on number of shot.

図4 t_d の動作回数に対する依存性

Fig. 4 Dependence of t_d on number of shot.

4. イオン源表面付着物の影響

ダイオードを動作すると、陽極イオン源表面には付着物が堆積する。この付着物は、イオンビームや電子の照射によって生じたアブレーションによる生成物と考えられる。陽極プラズマ生成過程や生成イオン種はこの付着物の影響を強く受けていると考えられることから、その組成の評価を行い、またこの付着物を除去した場合、 J_i , t_d 特性が回復するかを調べた。

付着物の組成評価は、陽極表面に Si 基板を設置し 7 ショットの連続動作後、Si 基板を蛍光 X 線分析器より分析した。図 5 の分析結果から Zn, Al, Si, Fe, Cu が検出されていることが分かる。これらのうち Zn, Al, Fe, Cu は、陽極（アルミ製）、陰極（ステンレス及び真ちゅう製）、BIC（銅製）のアブレーションにより発生したものと考えられる。なお炭素は本分析の検出範囲には含まれないが、表面は黒化しており付着物中に炭素も含まれている可能性がある。

図 6 は、7 ショット連続動作後の陽極表面の電子顕微鏡写真を示す。陽極表面は付着物で覆われており陽極表面が露出していないことが分かる（図 6 (a)）。また、表面には多数の微細孔が観られる（図 6 (b)）。これら付着物は、イオン源であるポリエチレン表面を覆い、ポリエチレンからの中性ガスやイオンの供給を妨げると考えられる。

図 7 は MID 連続動作特性の陽極の各種処理に対する依存性の評価結果を示す。ここで付着物は、有機溶剤を含んだ布で拭うことにより除去できる。実験は以下の手順で行った。

- 6 ショットの動作,
- 真空容器に乾燥空気を大気圧まで充填した後（3 分間）、再び 10^{-2} Pa まで排気,
- 3 ショットの動作,
- 乾燥空気を大気圧まで充填、付着物を除去し（3 分間

図5 7 回動作後の Si 基板のマススペクトル

Fig.5 Mass spectrum of Si substrate after 7 shots.

図6 7 回動作後の陽極表面写真

(a) $\times 780$, (b) $\times 3600$

Fig.6 Photographs of anode surface after 7 shots. (a) $\times 780$, (b) $\times 3600$

大気に曝露), 10^{-2} Pa まで排気,

- 5 ショットの動作,
- 真空ポンプを拡散ポンプからロータリーポンプへ切り替え, ≈ 10 Pa で 20 分間放置し、油拡散ポンプより 10^{-2} Pa まで排気,
- 1 ショットの動作.

実験は 5 回行い、その平均値及び各値のばらつきを図に示した。図より (c) の付着物を取り除かない場合、曝露後の 1 ショット（第 7 ショット）だけ J_i が高くなるものの、2 ショット目から低い値となり、また t_d の回復も見られない。(e) の付着物を取り除いた場合、曝露後 J_i が回復した後、ショット数の増加とともに徐々に低下し、 t_d は、ショット数の増加とともに長くなる。この特性は (a) に非常に近く、このことから、付着物を除去することで J_i と t_d は、初期状態に回復する。従って、連続動作特性はイオン源表面を覆う付着物に影響されていると考えられる。

一方、(c) の付着物がイオン源表面に堆積した場合でも、大気曝露後の 1 ショット目だけ J_i が回復する。この原因

図7 J_i , t_d の付着物除去に対する依存性

Fig. 7 Dependence of J_i , t_d on cleaning or non cleaning stucked matter.

として、真空ポンプの逆流油⁽⁷⁾などの影響が考えられる。しかしながら、(f), (g)の結果から、 J_i , t_d とも顕著な回復が見られず、従って油拡散ポンプ、ロータリーポンプからの逆流油は、この特性に影響を与えないことが分かった。

5. 検討・考察

MID 連続動作における J_i 低下要因として、有効ギャップ長の増加、ビームのイオン組成の変化などが考えられる。有効ギャップ長は、仮想陰極と陽極プラズマ間の距離であり、陽極プラズマの膨張が大きいほど有効ギャップ長は短くなる。複数のイオン種から成る混合プラズマの陽極プラズマ膨張機構はまだ詳細に解明されていないが^{(8), (9)}、陽極プラズマの温度・密度が高く、低Zイオン種の比率が多いほど膨張速度が速くなると予想される。

一方、複数のイオン種から成るビームの空間電荷制限電流 (J_{sl}) は次式で表される⁽¹⁰⁾。

$$J_{sl} = \frac{J_{po}}{\alpha_p + \sum_{k \neq p} \alpha_k \sqrt{\frac{m_k}{z_k m_p}}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで J_{po} は陽子だけの単極性空間電荷制限電流、 α_p , m_p はそれぞれ J_{sl} に占める陽子ビームの組成比と陽子質量、そして α_k , m_k , z_k はそれぞれイオン種 k のビーム組成比、質量、電離価数を表す。(1) 式より重イオンの組成比が高くなると J_{sl} が低下することが分かる。例えば組成比が、 $(H^+ : C^+ : Cu^+) = (0.7 : 0.3 : 0.0)$ と $(0.5 : 0.3 : 0.2)$ の混合ビームを比較すると J_{sl} / J_{po} は、前者で 0.57、後方で 0.32 となる。

MID における陽極プラズマ生成過程は以下のように考えられている⁽¹¹⁾、

(a) 高電圧が陽極に印加され、陰極から放出された電子の

一部が陽極イオン源を照射する、

(b) イオン源表面から吸着ガスが脱離し、表面近傍にガス層を形成する、

(c) 陽極表面への電子照射により陽極をチャージアップする⁽¹²⁾、

(d) チャージアップに伴う電界によりガス層に電子雪崩が発生しプラズマが生成される、

(e) プラズマのイオン源表面への衝突により、イオン源から更なるイオン、中性ガスが供給される、

(f) 十分な陽極プラズマが生成される。

ここで、付着物がない場合、陽極プラズマは吸着ガスの他に (e) の過程によりポリエチレンから分解した水素もプラズマ化する。一方、付着物がイオン源表面を覆った場合、(e) の過程での水素の供給が少なく、これに換わって金属イオンが放出され陽極プラズマ中に混入する。このためプラズマの平均質量数は上昇しプラズマ温度が低下するとともに、プラズマの膨張速度の低下、 J_{sl} の低下を生じると考えられる。これらはいずれも J_i の低下、 t_d 増加の原因となり、さらに平均質量数の上昇は、BICまでの飛行時間遅れを長くし t_d を増加させる。すなわち (e) の過程での水素の供給の低下が連続動作特性における J_i 低下 t_d 増加の原因と考えられる。

付着物の付いた陽極を大気にさらすと1ショットだけ J_i が回復する。この原因は、逆流油に影響されないことから (図7. (f), (g))、付着物を大気にさらすことに起因すると考えられる。先に示した通りプラズマの供給源は主に吸着ガスおよびポリエチレンの分解物と考えられる。図7 (c) の過程ではポリエチレンが付着物で覆われているためこの分解物からの供給はほとんど無く、主に付着物と付着物中の吸着・吸蔵ガスが供給源になると考えられる。この吸着・吸蔵ガスは1ショット動作での温度上昇でほとんど拡散・放出されてしまうため、 J_i の回復は1ショットに限られると考えられる。

6. むすび

MID 連続動作特性を評価した結果、以下の結論を得た。

- 1) $d = 5.0 \text{ mm}$ において J_i は、第1ショットで 350 A/cm^2 であるのに対し、ショット数の増加とともに減少し、第7ショットでは 150 A/cm^2 まで低下する。
- 2) 低下する割合は d が短いほど大きい。
- 3) 連続動作後のイオン源表面は、MID 材料 (Zn, Al, Fe, Cu) からのアブレーション物が付着している。
- 4) J_i 低下の原因は、イオン源表面を付着物が覆うためであり、付着物を取り除くと連続動作特性は回復する。
- 5) 大気圧のガス中に付着物のついた陽極をさらすと、最初の1ショットだけ J_i が回復する。

連続動作における J_i 低下原因を考察し、付着物がイオン源からの陽子の供給を妨げ、また陽極プラズマ中に付着物より生じたイオンが混入するために J_i が低下すると判断した。不純物イオンの混入は J_i 低下のみならず、ビー

ム純度を低下する。材料分野の応用では、ビーム純度の変化は材料生成条件等に影響を与えるので、付着物を除去し連続動作において安定なビーム純度を確保する必要がある。

(平成 7年12月11日受付, 平成 8年 7月10日再受付)

文献

- (1) T. H. Johnson: "Inertial confinement fusion: Review and perspective", *Proc. of IEEE*, **72**, 547 (1984).
- (2) K. Yatsui: "Industrial applications of pulse power and particle beams", *Laser & Particle Beams*, **7**, 733 (1989).
- (3) K. Yatsui, X. Kang, T. Sonegawa, T. Matsuoka, K. Masugata, Y. Shimotori, T. Satoh, S. Furuuchi, Y. Ohuchi, T. Takeshita and H. Yamamoto: "Application of intense pulsed ion beam to materials science", *Phys. Plasmas*, **1**, 1730 (1994).
- (4) E. L. Neau: "Environmental and industrial applications of pulsed power systems", *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, **22**, 2 (1994).
- (5) K. Yatsui, A. Tokuchi, H. Tanaka, H. Ishizuka, A. Kawai, E. Sai, K. Masugata, M. Ito and M. Matsui: "Geometric focusing of intense pulsed ion beams from racetrack type magnetically insulated diodes", *Laser & Particle Beams*, **3**, 119 (1985).
- (6) R. N. Sudan and R. V. Lovelace: "Generation of intense ion beams in pulsed diodes", *Phys. Rev. Lett.*, **31**, 1174 (1973).
- (7) L. Maurice, P. Duval and G. Gorinas: "Oil back streaming in turbomolecular and oil diffusion pumps", *J. Vac. Sci.*, **16**, 741 (1979).
- (8) R. Pal and D. Hammer: "Anode plasma measurement in a magnetically insulated diode", *Phys. Rev. Lett.*, **50**, 732 (1983).
- (9) Y. Maron, M. D. Coleman, D. A. Hammer and H. S. Peng: "Measurements of the electric field distribution in high-power diodes", *Phys. Rev. Lett.*, **57**, 699 (1986).
- (10) D. L. Hanson, J. L. Porter and R. R. Williams: "High-purity ion beam production at high current densities with a liquid-helium-cooled series-field-coil extraction ion diode", *J. Appl. Phys.*, **70**, 2926 (1991).

(11) E. W. Gray: "Vacuum surface flashover: A high-pressure phenomenon", *J. Appl. Phys.*, **58**, 132 (1985).

(12) D. J. Johnson, J. P. Quintenz and M. A. Sweeney: "Electron and ion kinetics and anode plasma formation in two applied $B_{\perp}$ field ion diodes", *J. Appl. Phys.*, **57**, 794 (1985).

千代 悦司

(学生員) 昭和43年4月27日生まれ。平

成元年3月福井工業高専(電気)卒業。3年3月長岡技術科学大学(電子機器)卒業。現在、同大学院博士課程(エネルギー・環境)在学中。パルスイオンビーム発生の研究に従事。日本物理学会会員。

升方 勝己

(正員) 昭和29年5月12日生まれ。53年

3月大阪大学(電気)卒業。同年4月沖電気工業(株)入社。57年3月長岡技術科学大学大学院(電子機器)修了。同年同大学電気系助手。63年5月同助教授。パルスイオンビームの開発と応用, パルスパワー工学の研究に従事。工学博士。日本物理学会, プラズマ・核融合学会会員。

八井 浄

(正員) 昭和14年11月3日生まれ。42年

3月大阪大学大学院博士課程(電気)単位取得退学。同年4月同大学基礎工学部助手。53年4月長岡技術科学大学電気系助教授, 54年1月~55年1月アメリカ・コーネル大学客員準教授。60年4月長岡技術科学大学教授, 同粒子ビーム工学セン

ター長。パルスパワー技術の開発と応用, 特にパルスイオンビームの開発と応用(レーザー励起, 材料開発, 慣性核融合など)に関する研究に従事。工学博士。平成5年電気学会業績賞受賞。日本物理学会, 応用物理学会, レーザー学会, プラズマ・核融合学会, 米国物理学会会員。