プラズマイオン注入を目的とした新しいモデュレータ動作 へのターゲット面積およびターゲット位置の効果

正 員 行村 建 (同志社大学)
 学 生 員 寺本 智之 (同志社大学)
 学 生 員 久世 英司 (同志社大学)
 正 員 松永 浩一 (ハイドン研究所)

Effect of target area and position on electrical characteristics of a new type of PBII Modulator adaptable to a wide range of load resistance

Ken Yukimura, Member, Tomoyuki Teramoto, Student Member, Eiji .Kuze, Non Member
 (Doshisha University), Koichi Matsunaga, Member (Haiden Laboratory Inc.)

This article describes a preliminary test results obtained by a newly-developed pulse modulator which is independent on the plasma parameters and the substrate configuration. The modulator will be employed for Plasma-based Ion Implantation (PBII). The typical data obtained are an output voltage of 5kV and a pulse length of 10 microseconds, which is independent on the target diameter (60 mm and 100mm) and the distance (150 mm and 400 mm) between the target and metal arc source. The voltage waveform is in a rectangular shape with the rise and fall times less than 1 microsecond due to a closing switch which is newly set in parallel with the target as a modulator load. In a conventional modulator with a transformer for raising up the primary voltage, the same parameter surveys have been carried out and have strongly affected by the target diameter and distance due to the high circuit impedance.

キーワード：プラズマイオン注入, PBII, PIII, PSII, モデュレータ

1. まえがき

プラズマイオン注入の要素技術としては(1)プラズマ発生技術, (2)モデュレータ技術, (3)接続線技術に大別される。本研究は(2)モデュレータ技術に関連する。モデュレータ技術の中核的な要素は(2-1)スイッチ技術, (2-2)波形成形技術, (2-3)保護技術に分けられる。

モデュレータ主回路のスイッチを閉とすることにより電流が流れる。スイッチのターンオン特性が出力波形の立ち上がり特性を左右する。可能な限り早い時間のうちにオンさせイオンシースの形成によりイオンを加速する。閉スイッチ素子としては半導体素子や真空管をはじめとしてサイラトロンなども用いられる。

接続線技術はモデュレータ出力とターゲットの接続技術であり, 電流導入端子における絶縁技術も含まれる。接続に伴う漂遊容量の減少が重要である。モデュレータの出力エネルギーの一部は漂遊容量を充電し, 効率の低下を招く。

モデュレータ技術はプラズマイオン注入の基幹技術である。矩形パルス電圧の発生を目的とし, イオンを線形加速

する。モデュレータ出力にターゲットおよびプラズマが直列に接続される。負荷であるプラズマやイオンシースのインピーダンスはプラズマ密度はもとより, ターゲット形状(面積, 体積, 曲率など)により変わる。

プラズマ中にあるターゲットに負電圧が印加されると質量の小さい電子が排斥され, イオンシースが形成される。電子の応答時間は電子プラズマ振動周波数の逆数程度の時間オーダーであり, ナノ秒のオーダーで排斥される¹⁾。このように電子の応答時間は高速であるため, 初期のターゲット印加電圧波形やターゲット電流波形にはスイッチ素子のターンオン時間が大きく影響する。

一方, 電圧の立下り時(所定のパルス幅の設定によりスイッチ素子は強制的にオフされる)は負荷インピーダンスが影響する時間領域である²⁾。負荷とはターゲット周囲に形成されるイオンシースキャパシタンスや抵抗を指す。イオンシース容量およびターゲットや電流導入端子などの接続に伴う漂遊容量はモデュレータ出力電圧値に充電されており, スイッチがオフとなることより回路抵抗およびシース抵抗などを通して放電する。放電電流は充電電流とは逆方向に流れるため, 反転電流として観測されることもある

²⁾。放電の時定数は μs オーダーに達し、電圧波形に波尾を生ずる。電圧波尾の領域はスパッタの領域に達したり、高繰り返しパルス電圧印加時には、電圧が十分にゼロに復帰しないまま電圧が再印加されることも起こる。後者の場合、定期的にターゲットの周囲にイオンシースが形成され、3次元形状物への均一注入の妨げとなる。このような結果はプラズマイオン注入に好ましい結果をもたらさない。

従来の研究において負荷であるプラズマやイオンシースが印加電圧波形に直接影響し、問題となることは多くの研究において指摘されている。たとえば、G. Bohm ら³⁾は負荷インピーダンスがターゲットの大きさとプラズマパラメータに依存することを指摘した。しかるに従来のモジュレータでは、それぞれの応用に対応できるようにモジュレータとの間のインピーダンス整合を取ることは困難であると述べている。また、Scheuer ら⁴⁾はサイロトロンモジュレータを用い、ターゲット負荷とパルス形成回路との間のインピーダンス不整合により、主パルスとは別の副次パルスの発生を指摘している。Collins ら⁵⁾はモジュレータの特性が負荷であるプラズマに大きく影響され、シース挙動が変化することを指摘した上で、結果としてプラズマパラメータによってはモジュレータの使用電圧に制限が加わることを述べている。

我々は負荷の影響を受けない、モジュレータ固有の出力電圧をターゲットに印加する回路方式を提案する。本研究ではターゲット印加電圧波形について金属蒸気プラズマ源(直流)とターゲット間の距離およびターゲット面積の影響を中心としてターゲット印加電圧波形の変化について検討する。結果として、モジュレータ特性としては、負荷に影響されない特性となることを報告する。

2. 回路方式

図1 新しいモジュレータの基本動作図

Fig.1 A schematic diagram of a new modulator for PBII

モジュレータ動作の概要を図1に示す。図中、左がモジュレータ出力、右に真空容器があり、真空容器の内部にターゲットがある。閉スイッチは2個設けられている。図中には2つのスイッチの動作を示す。SW1はモジュレータの出力電圧をターゲットに印加するのが目的であり、SW2は負荷(プラズマおよびイオンシース)に並列に設けられており、オフ時の電圧を速やかにゼロにするために新たに設けられている。

ターゲットへのパルス電圧の印加はSW1をオンさせて行い、所定のパルス幅に達すると、SW1をオフし、同時にオン信号をSW2に加える。SW2がオンすると、負荷は短絡されるため $1\mu\text{s}$ 以下の短時間の内に負荷はゼロ電位に達する。

開発されたモジュレータはSW1とSW2の2つのスイッチ動作と共にモジュレータの出力インピーダンスを約 3Ω と低くした点にも特徴を持つ。低インピーダンスとするために、昇圧のための変圧器を設けていない。このようにして負荷インピーダンスそのものの影響を受けない定電圧特性とすることができる。モジュレータの閉スイッチ素子はMOSFET(耐圧1600V、許容電流40A、10個直列接続)であり、直流電源(最大出力4kW)の出力を負荷であるターゲットに直接接続する。したがって、モジュレータの出力インピー

(a) Target applied voltage

(b) Current through the target

図2 ターゲットへの印加電圧波形とターゲットを流れる電流波形例(チタン直流プラズマ70A、ターゲットの直径60mm)⁶⁾

Fig.2 Waveforms of voltage applied to the target and current through the target (Titanium arc current:70A and target diameter:60mm)⁶⁾

図3ターゲット周囲の等価回路

Fig.3 Equivalent circuit of modulator and target

ダンスは、事実上、閉スイッチ素子のオン時の抵抗(1個あたり $0.2 \sim 0.3 \Omega$)のみとなり、モジュレータシステムとしての全出力インピーダンスは 3Ω 以下の小さな値となる。

本研究において提案している方式は低インピーダンス、オフ時に負荷を短絡する方式であるので、目的とするパルス電圧をターゲットに印加できる特徴を持つ。

3. 従来形モジュレータのターゲット印加電圧・電流特性

＜3.1＞プラズマおよびイオンシースの影響 本節では、主スイッチが1個であり、昇圧用の変圧器(昇圧比1:3)を用いた場合のモジュレータを用いたときの電圧、電流特性について検討する。

ターゲットに電圧を印加することにより、電圧に波尾が生ずる例を図2²⁾に示す。(a)は電圧、(b)はターゲットを流れる電流を示す。等価回路を図3に示す。図2の特性は直流金属蒸気アークプラズマ(電流70A)にて得られた。設定されたパルス幅は $30 \mu s$ であるが、図より明らかなように $30 \mu s$ 以降、電圧がゼロに復帰するプロセスで、約 $10 \mu s$ の時定数を持つ。これはイオンシースおよび漂遊容量の合成容量 $C(=C_1+C_2)$ に充電された電荷がイオンシースおよび回路の抵抗 $R(=R_1+R_2)$ や昇圧トランスを含むモジュレータの持つインダクタンスや回路インダクタンス L を通じて放電する時間を表す。実験で得られた電圧、電流波形をカーブフィットして求められた定数は $C=200 pF$, $R=17 k \Omega$, $L=7.2 mH$ である²⁾。また、電圧減衰時の等価周波数を $10 kHz$ とすると、 L の持つインピーダンスは約 $0.5 k \Omega$ に相当する。したがって、 C に蓄積された電荷の放出は主として R を通じて行われることがわかる。このことはパルス電圧のオフ時に R の両端(主ラインと接地線の間に存在する)を橋絡すれば波尾の時定数を小さくすることができる。

プラズマの有無により印加電圧波形が変化する例を図4²⁾に示す。図はrf($13.56 MHz$)放電による場合であり、継続時間 $1 ms$ のバースト波であり、休止期間 $9 ms$ (デューティ比10%)にて繰り返し運転された。この場合のモジュレータは、一次電圧をパルス変圧器(巻数比1:18)により昇圧している。

(a) Delay time: 0 ms

(b) Delay time: 1.5 ms

(c) No plasma phase

図4 プラズマの有無による印加電圧波形の変化

Fig.4 Change of the electrical characteristics around the target with and without plasma

(a)～(c)はターゲットに印加されるパルス電圧のタイミングが異なる。(a)はプラズマがターゲットの周囲に存在し、図3中、 C_1 と R_1 にて決定されるシースインピーダンスが低い場合、(b)はいわゆるアフターグローの状態であって、シースインピーダンスは(a)よりは高く、(c)よりは低い領域にある。(a)において C を $200 pF$ と仮定すると、 R は $100 k \Omega$ 程度と見積もられ、(b)では3～4倍の値を持つ。(c)はプラズマがターゲットの周囲に存在しない場合であり、ターゲット周辺の抵抗はほぼ無限大である。このように電圧印加のタイミングによりシースの等価インピーダンスが変化し、立ち下がり部である電圧波尾の特性が大きく異なることがわかる。スイッチオフ時の印加電圧の立ち下がり領域を見ると、プラズマ負荷がある場合には早い立ち下がりであるのに対し、プラズマが薄い(密度が低下する)状態(図(b))では波尾が長くなる。図(c)はプラズマが存在しないため、終端開放となり、電圧の降下は見られない。

図5ターゲット直径80mmにおけるターゲット印加電圧波形(アーク源からの距離150mm)

Fig.5 Waveform of applied voltage to the target of 80 mm diameter (Distance between target and arc source:150 mm)

図6ターゲット直径が100mmにおけるターゲット印加電圧波形(アーク源からの距離150mm)

Fig.6 Waveform of applied voltage to the target of 100 mm diameter (Distance between target and arc source:150 mm)

特性の違いは負荷であるターゲット周辺のインピーダンスの大小の結果である。

ターゲット周囲のインピーダンスはターゲットに流れる電流値にも影響する。初期にピークに達した後、おおむね一定電流が観測される。(a)の場合は(b)よりも大きい。(c)では流れない。(c)において観測される初期のパルス電流は回路に存在する漂遊容量を充電する電流である。この電流は(a)や(b)にも同様に存在する。

<3.2>ターゲット面積およびターゲット距離のモジュレータ電圧に与える影響 従来のモジュレータを用いてターゲット面積やアーク源とターゲット間の距離によってターゲット印加電圧が変化する様子を観測した。プラズマ源は接点分離式のトリガ放電により起動される金属蒸気アークである。図5、図6は、それぞれ、アーク源とターゲット間の距離を150mmとしたとき、ターゲット直径80mmと100mmの場合の印加電圧波形を示す。図中には参考のために定抵抗(抵抗値15kΩ)を負荷として用いたときの電圧波形を破線で表す。図5および図6から電圧波形の立ち上がり特性が距離やターゲットの大きさに大きく影響されていることがわかる。

(a)Target diameter:60mm

(b)Target diameter:80mm

(c)Target diameter:100mm

図7開発されたモジュレータによるターゲット印加電圧波形およびターゲット電流(ターゲット-アーク源間距離400mm)

Fig.7 Waveforms of target applied voltage and current through the target (Distance between target and arc source :400mm)

ターゲットパラメータによる印加電圧の変化は、モジュレータが有限の出力インピーダンスを持つこと、ターゲット周辺の漂遊容量やシース容量が変化するためである。しかるにモジュレータ出力インピーダンスが無視できる程度に小さくなればモジュレータの出力電圧のパルス幅に対して十分に小さい時定数となり、このような波形の変化は生じない。

図5の昇圧用トランスを用いる場合はモジュレータ出力インピーダンスにより電気的特性に違いが生ずる典型例である。モジュレータ出力が変圧器を介さないでターゲットに直接接続される場合、系は比較的低インピーダンスとなり、図5～図7で見られたほど大きな電圧波形の変動は起こらないと考えられる。しかるに、図5や図6の結果からターゲットの大きさによって容量が変化する事実はプラズ

マイオン注入において大型物、小物大量ターゲットへの均一注入の目的のためには系が高インピーダンスとなることは避ける必要がある。すなわち、プラズマイオン注入において複雑形状物に対する処理を行う場合にはモデュレータのインピーダンスを小さくし、かつターゲット形状や曲率、配置などによるターゲット周囲の容量(接地容量が大部分と考えられる)をできるだけ少なくするような余裕のある設計が必要と結論される。

一般に、モデュレータの設計、組み立てを行う場合、モデュレータ内に出力波形調整用の回路素子の挿入が行われる。場合によってはダイオードによる反転電圧の抑止も行われる。さらにモデュレータおよび全系統の保護対策としてクロバスイッチや真空管系においてはブランキング回路が設けられる。これらの保護対策を講じた場合、接地に対する漏れ抵抗等が存在しており、接地系への電流の漏洩があり、電圧波形を歪ませる。

以上よりモデュレータ出力電圧は負荷であるターゲットや回路定数(漂遊容量、回路インピーダンス)の影響を受ける。特に、印加電圧の波尾に大きな変化が現れること、立ち上がりについても若干の違いが発生することがわかった。

4. 本研究により開発された負荷に影響されないモデュレータ特性

図7は開発されたモデュレータによるターゲット印加電圧波形およびターゲット電流を示す。ここではターゲットの直径を60mmから100mmまで変化させた。図より明らかにターゲット直径の変化によって電圧特性には何らの変化が見られず、プラズマやターゲットの影響をほとんど受けない特性となっていることがわかる。初期の電流は $1\mu\text{s}$ 以内の短時間で急峻に立ち上がり、速やかに定常電流に達する。Lieberman¹⁾の指摘する空間電荷制限電流が印加電圧の $3/2$ 乗に比例するチャイルド・ラングミュア則を満足する波形を呈しているとも考えられる。立下りについても同様に速やかな時間推移が見られる。このように開発されたモデュレータは低出力インピーダンスであって、かつ電荷放出用に設けられた閉スイッチ素子の動作により、従来から問題とされてきた負荷による波形の変化をなくすることができる。

以上より、本研究において開発されたプラズマイオン注入用パルスモデュレータは負荷の影響を受けない電圧特性となっており、種々の曲率を有する三次元形状物への均一なイオン注入に対し有効と考えられる。

5. むすび

負荷に影響されないプラズマイオン注入用モデュレータの開発を行った。パラメータとしてはプラズマ源(金属蒸

気粒子プラズマ源)からの距離やターゲットの大きさを変えた場合の特性の変化についてターゲット印加電圧およびターゲット電流波形の時間変化を観測した。開発されたモデュレータは所定のパルス幅を得るために負荷側を短絡する機能を持つとともに低インピーダンス形にて構成されている。

比較のために比較的インピーダンスが高い構成となる昇圧トランスを持つモデュレータにおいても特性の観測を行った。その結果、モデュレータ回路中に存在するインピーダンスによりターゲット印加電圧波形は大きく変化する。またターゲットの大きさは真空容器との間の容量など電気パラメータの変化を引き起こし、電圧波形に大きく影響する。プラズマイオン注入において均一注入をもたらすためには負荷による特性の変動を低減する必要がある。

開発されたモデュレータは負荷に関係なく、同一の波形を呈することが明らかにされ、三次元形状物への均一イオン注入に対し、有効であると考えられる。

(平成12年9月4日受付, 平成12年12月15日再受付)

文 献

- [1] M.A. Lieberman: J. Appl. Phys., 66, 2926-1919 (1989)
- [2] 天野, 行村 & 政宗: 電気学会プラズマ研究会資料, 資料番号EP-99-49 (1999)
- [3] G. Bohm & R. Gunzel: J. Vac. Sci. Technol. B, 12(2), 821-822 (1994)
- [4] J.T. Scheuer, K.C. Walter, R.A. Adler & W.G. Horne: Surface and Coatings Technology, 93, 192-196 (1997)
- [5] G.A. Collins, K.T. Short & J. Tendys: Surface and Coatings Technology, 93, 181-187 (1997)
- [6] K. Yukimura, K. Ohno, M. Koto, S. Kurooka, Y. Suzuki, A. Kinomura, A. Chayahara & Y. Horino: Surface and Coatings Technology, 103-104, 252-256 (1998)

行 村 建

(正員) 1948年2月11日生まれ。77年3月同志社大学工学研究科博士課程修了。同年4月同大学工学部電気工学科助手、79年4月同専任講師、86年4月同助教授、92年4月同教授、現在に至る。工学博士。主として、エキシマレーザ、真空紫外光、パルスイオン注入などパルスパワーに関する研究に従事。IEEE, 日本物理学会、応用物理学会、プラズマ・核融合学会会員、レーザー学会会員

寺 本 智 之

(学生員) 1977年2月24日生まれ。1999年3月同志社大学工学部電気工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程入学，現在に至る。主にイオン注入に関する研究に従事。

松 永 浩 一

(正員) 1943年生。1967年3月工学院大学電子工学科卒業。1986年春日電機株式会社技術部長，高圧安定化電源機器の開発に従事。1991年株式会社ハイデン研究所代表取締役。高圧電源機器の開製造販売に従事。

久 世 英 司

(学生員) 1977年6月7日生まれ。2000年3月同志社大学工学部電気工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程入学，現在に至る。主にイオン注入に関する研究に従事。