

# プラズマイオン注入法を用いた薄膜形成、および表面処理

田中 武\*

(令和3年11月5日受付)

## Thin film formation and surface treatment using plasma ion implantation method

Takeshi TANAKA\*

(Received November 5, 2021)

### Abstract

In the PBII method, the ion density in the sheath could be obtained based on the modulator equivalent circuit. In the PBII method, the self-igniting plasma used in the sterilization process was formed, and the plasma density and sheath length could be calculated from the obtained discharge current-high voltage waveform. Using this method, some of the important parameters such as plasma density and sheath length could be obtained when designing the equipment in the future.

**Key Words:** plasma based ion implantation, plasma density, oxygen, nitrogen

## 1 はじめに

プラズマとは、電離した気体であり、固体、液体、気体に次ぐ第4の状態と表される。プラズマを用いた技術は多岐にわたり、とりわけ半導体製造技術に用いられている。その一例として、薄膜形成技術、表面改質技術および微細加工技術などがある。これらの技術は、集積回路の高集積化・高性能化、それに伴う電極や配線などの回路パターンの微細化に対応して進展しており、今日、半導体デバイスやマイクロマシン製造および表面改質などをはじめとする微細加工技術の分野で不可欠なプロセスとなっている。

半導体関連以外にも、プラズマ応用技術に関して多くの研究が行われており、環境改善技術や医療関連技術などがある。特に、バイオ・医療への応用が行われている。<sup>1,2)</sup>

プラズマを用いた技術の一つである、プラズマイオン注入法を用いて、医療機器などの殺菌技術への応用が行われている。医療機器を殺菌するプラズマ装置としては、過酸化水素を用いたものがある。<sup>3)</sup>しかしながら、健康面への影響なども指摘される事例がある。それに代わる技術として、プラズマイオン注入法での殺菌に関する実験が試みら

れている。<sup>4)</sup>

また、殺菌対象物は医療機器以外にも食品に付着している微生物も考えられる。一般的に食品の殺菌は、加熱殺菌が用いられている。しかしながら、加熱を行うことで食品の品質を損なう恐れがある。そのため、非加熱殺菌法を用いた新規殺菌技術が注目されている。<sup>5)</sup>

プラズマイオン注入法は、1980年代中ごろにガスプラズマを用いてR.J.AdlerやJ.R.Conradらにより提案された。<sup>6,7)</sup>また、時を同じくして金属イオンによる注入法も提案されている。これらの共通用語として、Plasma-Based Ion Implantation (PBII)がよく使用されている。<sup>8)</sup>

PBII法は、プラズマ中のサンプルに対して、負の高圧パルス電圧を印加することでサンプル表面にイオンシースが形成され、表面改質を行うものである。シースの形状をサンプルに沿った形状にすることで、イオンを均一に注入することが可能である。制御性の良さから、様々な形状物への表面処理方法として有効な手法として有望視されている。

現在、半導体におけるドーピング技術、産業用部品、金属材料の表面改質、医療技術や殺菌技術への応用など多岐にわたって使用されている。<sup>9,10)</sup>

\* 広島工業大学工学部電子情報工学科

本報告では、PBII法において、プラズマ制御法およびプラズマ生成法を検討するために、シース内イオン密度の算定や分光器を用いてプラズマの状態について述べる。

## 2 初歩的なプラズマ密度算定方法

### 2.1 概要

プラズマを扱う上で、プラズマの状態を知ることがとても重要なことである。そのプラズマの状態を決定するのが、プラズマパラメータ（温度、密度など）であり、これらを適切に把握することでプラズマを有効利用することができる。プラズマパラメータを測定し、プラズマの状態を知ることがプラズマ計測・診断といい、様々な計測法が開発されている。その一例として、プローブ法によるもの、光や電磁波を用いた計測法が挙げられる。<sup>11~14)</sup>

プラズマイオン注入（PBII）法は、その制御性の良さから、様々な形状物への表面処理方法として有効な手法とされている。<sup>15)</sup> PBII法の要素技術は、(1)プラズマ発生技術、(2)モジュレータ技術に大別される。モジュレータ技術は、イオンシースの形成とシース内のイオンの挙動に直接影響するためプラズマイオン注入法の基幹技術である。

一方、高電圧の印加に伴うプラズマ内の現象であり、パルスプラズマの特性、形成されるイオンシースの挙動など基本的な物理現象について不明な点が多い。過去の研究で、PBII法においてターゲット印加電圧波形の時定数の変化を用いたプラズマ密度の算定法が提案されている。<sup>16)</sup>

本章では、負の高圧パルス電源のみを有する自己点弧プラズマを用いたPBII法における、形成されたイオンシース内部のイオン密度を、モジュレータ回路を基礎として算定を行う。すなわち、PBII法において、滅菌プロセスで使用される自己点弧プラズマを形成し、取得した放電電流－高圧電圧波形からプラズマ密度およびシース長の算定を行う。また、RF電源と併用して用いた場合のプラズマ密度の算定も合わせて行う。

## 2.2 電流電圧波形測定

### 2.2.1 概要

プラズマイオン注入（PBII）法は、その制御性の良さから、様々な形状物への表面処理方法として有効な手法とされている。<sup>15)</sup> PBII法の要素技術は、(1)プラズマ発生技術、(2)モジュレータ技術に大別される。モジュレータ技術は、イオンシースの形成とシース内のイオンの挙動に直接影響するためプラズマイオン注入法の基幹技術である。

一方、高電圧の印加に伴うプラズマ内の現象であり、パルスプラズマの特性、形成されるイオンシースの挙動など基本的な物理現象について不明な点が多い。過去の研究で、PBII法においてターゲット印加電圧波形の時定数の

変化を用いたプラズマ密度の算定法が提案されている。<sup>16)</sup>

本項では、電流電圧波形を用いた初歩的なプラズマ性状の比較法を提案し、電圧波形より求まる初歩的なプラズマ密度算定法について述べる。

### 2.2.2 電流波形による比較法

Fig. 1に比較用電流波形を示す。

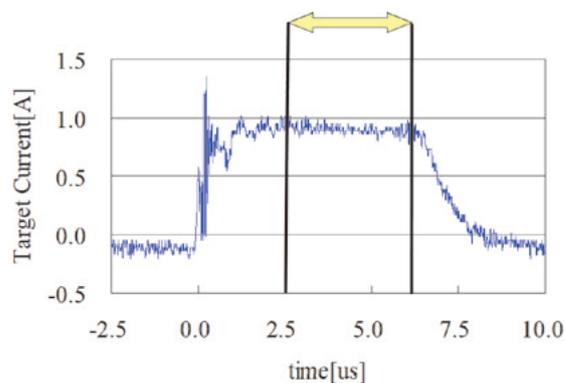


Fig. 1 比較用電流波形

Fig. 1において、電流波形は time=0.0us（マイクロ秒、以下 us）近傍では激しく振動している。これに対して、time=2.5-6.3us 程度では安定しており、この時間の平均電流を一指標として電流量の多少の比較に用いられると考える。

### 2.2.3 電圧波形による比較法

Fig. 2に比較用電圧波形を示す。

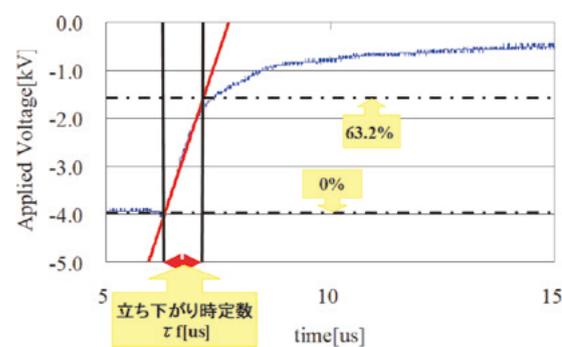


Fig. 2 比較用電圧波形

Fig. 2は電圧波形の立下り部分である。イオン注入装置を、後述する等価回路に置き換えた場合、立下り初期の傾きによって、印加電圧（図中では 4 kV）の63.2%に当たる電圧（図中では -2.53 kV）の立下りに必要な時間を立下り時定数と考えることが出来る。この時定数はイオン密度の量に負の相関関係をもち、一指標として用いることが出来る。また、この指標の算出は簡易であり、後述の密度算定の参考となるため予備実験の際の重要な指標となりえる。

## 2.3 プラズマ密度算定方法<sup>6~10</sup>

### 2.3.1 モジュレータ回路定数の算定

矩形パルス電圧の発生は、イオンシース内部のイオンを線形加速する。モジュレータの出力には、基材（ターゲットと称する）とプラズマが直列に接続される。プラズマに浸された基材にパルス電圧が印加されると、(1)電子の排斥に伴うマトリックスシースの形成、(2)イオンシースのプラズマ中への進展、(3)定常状態と時間発展をする。(2)では主としてシース発展によるイオンの供給、(3)ではボーム速度によるイオンのシース内への供給である。いずれにしてもイオンはシース内で加速され、ターゲットに向かう。

上記の過程を電気回路の観点からまとめると以下のとおりとなる。(1)においてイオンシースはキャパシタ  $C_1$  および並列抵抗  $R_1$ （シース抵抗と称する）として表される。電圧の印加に伴って、スパイク状の電流が流れる。(2)ではキャパシタに蓄積された電荷がシース抵抗に流れ、印加電圧値をシース抵抗で除した値の電流が流れる。

実際には漂遊容量  $C_2$  とモジュレータの出力インピーダンス  $R_2$  が加味される。漂遊容量はシースキャパシタに並列であり、パルス電圧の印加と同時に充電される<sup>11,12</sup>。出力インピーダンスは回路に直列である。以上をまとめた等価回路を Fig. 3に示す。

したがって、これらの回路定数で決まる時定数にて印加電圧波形は時間推移する。すなわち、出力が理想的な矩形であっても立ち上がり時間および立ち下がり時間が生じ矩形電圧から外れる。観測される電圧、電流はとりもなおさずプラズマの特性を反映したものである。

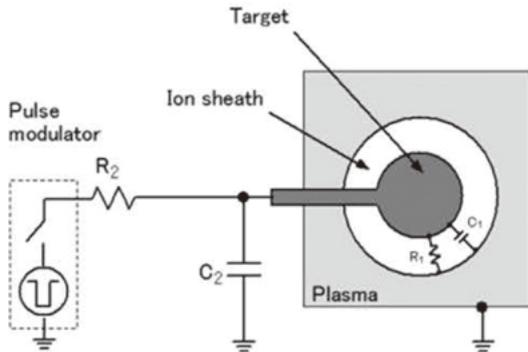


Fig. 3 モジュレータ等価回路

Fig. 3において、 $R_2$ と  $C_2$ は定数であるのに対し、 $R_1$ 、 $C_1$ はイオンシースに関与するためパルス電圧印加時には時間的に変化する量である。プラズマ密度の算定を行う場合、まず  $R_2$ および  $C_2$ を知る必要があり、このためにプラズマの代わりにキャパシタと抵抗を負荷として用いる。ターゲットにパルス電圧を印加して、一定電圧に達するまでの時間を立ち上がり時間  $\tau_r$ 、モジュレータ出力がオフとなった以降、電圧が元の状態に復帰する時間を立ち下

がり時間  $\tau_f$ と定義する。立ち上がり時間および立ち下がり時間から回路定数を算定する。(1)立ち下がり時間について、 $R_2$ は影響しないため、漂遊容量  $C_2$ の放電時間により算定される。したがって、既知の抵抗を負荷 ( $R_{load}$ と称する) に接続し、その場合の立ち下がり時間を測定し、 $C_2$ を知る。すなわち、

$$C_2 \times R_{load} = \tau_f \quad (1)$$

(2) $R_2$ については負荷にキャパシタ  $C_{load}$ を接続し、その立ち上がり時間から求める。すなわち、

$$R_2 \times (C_2 + C_{load}) = \tau_r \quad (2)$$

$C_2$ は(1)により既知であり、 $C_{load}$ はあらかじめ既知のキャパシタを用いるため、 $R_2$ を求めることができる。キャパシタを用いるのは漂遊容量に並列に入り計算が容易なためである。

### 2.3.2 イオンシース抵抗

$R_1$ は一般的に抵抗率  $\rho$ 、対象物の長さ  $s$ 、対象物の面積  $A$ を用いて

$$R_1 = \rho \frac{s}{A} \quad (3)$$

にて表される。プラズマイオン注入において  $\rho$ はシースの抵抗率、 $s$ はシース長、 $A$ はターゲットの面積に相当する。シース内では無衝突とする。イオン種の質量  $m$ 、ターゲット印加電圧  $V_p$ 、電子電荷  $e$ 、シース内でのイオン速度  $v$ とするとターゲット面では

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV_p \quad (4)$$

から

$$v = \sqrt{\frac{2eV_p}{m}} \quad (5)$$

が得られる。一方、ターゲット表面での電流密度  $j$ は、導電率  $\sigma$ と電界  $E$ で表され

$$j = en_i v = \sigma E = \sigma \frac{V_p}{s} \quad (6)$$

であり

$$en_i \sqrt{\frac{2eV_p}{m}} = \sigma \frac{V_p}{s} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{V_p}{s} \cdot \frac{\sqrt{m}}{en_i \sqrt{2eV_p}} \quad (8)$$

から

$$\rho = \frac{\sqrt{m}}{en_i s} \cdot \frac{\sqrt{V_p}}{\sqrt{2e}} \quad (9)$$

が得られ

$$R_1 = \rho \frac{s}{A} = \frac{1}{en_i A} \sqrt{\frac{mV_p}{2e}} \quad (10)$$

が求められる。式(10)ではシース長によらない式であることがわかる。また、式(10)に  $V_p$  を与えると、 $R_1$  を実験値などにより知ること、ターゲット表面でのプラズマ密度  $n_i$  (シース内イオン密度) を求めることができる。

### 2.3.3 漂遊容量

平行平板イオンシースの容量  $C_1$  は

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 A}{s} \quad (11)$$

にて表される。ここで  $\epsilon_0$  は真空の誘電率である。 $C_1$  の算定にはシース長を知ることが必要である。Lieberman による解析をもとにしてシース長の算定を行うことができる。結論としてはイオンシースの持つ容量は漂遊容量に比べて 1~2 桁程度低い値であり無視される。計算に用いたシース長は式(12)にて表される。

$$s = \left(\frac{4}{3}\epsilon_0\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{2e}{m}\right)^{\frac{1}{6}} \frac{V_p^{\frac{1}{2}}}{(en_i)^{\frac{1}{3}}} t^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

ここで、漂遊容量  $C_2$  は 200pF 以上あり、実験室における小型のターゲットの場合

$$C_2 \gg C_1 \quad (13)$$

と扱うことができる。 $C_1$  を考慮した場合の印加電圧の立ち下りにおける時定数  $\tau_f$  は

$$\tau_f = (C_1 + C_2)R_1 \quad (14)$$

となる。式(13)を考慮すれば

$$\tau_f = C_2 R_1 \quad (15)$$

となり、実測される  $\tau_f$  と漂遊容量  $C_2$  により  $R_1$  を算定することができる。

### 2.3.4 プラズマ密度の算定

プラズマ密度は簡易的に式(10)により行う算定することができる。しかし、より正確にプラズマ密度の算定を行うためにはパルス幅  $t$  および印加電圧  $V_p$  を与えることにより、シース長はプラズマ密度の関数となる。すなわち、

$$s = s(n_i) \quad (16)$$

となり、式(11)より

$$C_1 = C_1(n_i) \quad (17)$$

および式(10)より

$$R_1 = R_1(n_i) \quad (18)$$

となる。よって式(17)および式(18)を式(14)に代入し、 $\tau_f$  を実測し、 $C_2$  を既知とすると未知数は  $n_i$  のみとなりターゲット面でのプラズマ密度を算定することができる。

## 2.4 実験方法

Fig. 4に実験装置の概略図を示す。本装置のチャンバ材質はステンレススチール (SUS) である。サイズは高さ 450mm、幅 590mm、奥行き 470mm である。SUS 製電極は接地されたチャンバから絶縁され、チャンバの中心に設置されている。本実験に用いた高圧パルスモジュレータ (栗田製作所) は、繰り返し周波数最大 500pps、最大約 8 A の容量をもち、最高 15kV の負のパルス電圧をパルス幅 2~30  $\mu$ s でターゲットに照射することができる。高圧パルス電圧は、パソコン内のコンピュータ制御システム (Fotgen2) により制御される。放電電流 - 高圧電圧波形の測定にはデジタル・オシロスコープ (waverunner, IWATSU-LeCroy 社製) を用いて行った。

ガス種に酸素ガス (99.99995%)、窒素ガス (99.9998%)、を用いて行った。それぞれのガスは、チャンバ内の圧力を 10Pa 程度まで排気し、それぞれのガスを圧力 1 kPa まで注入し、この操作を 3 回繰り返すことでチャンバ内のガスの純度を 99.999999% になるようにした。

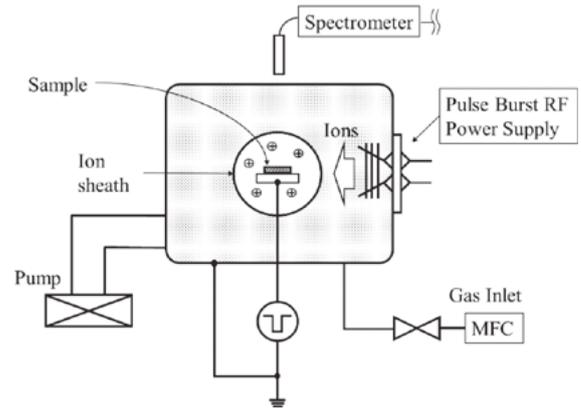


Fig. 4 実験装置概略図

## 2.5 実験結果

### 2.5.1 印加電圧依存性

Fig. 5に酸素ガスを用いたときの、自己点弧プラズマにより取得された、ターゲット電流および印加電圧波形を示す。また、Fig. 6に窒素ガスを用いたときの、自己点弧プラズマにより取得された、ターゲット電流および印加電圧波形を示す。これらのガス圧は 3 Pa である。

電流の特性をみてみると、酸素ガスおよび窒素ガスともに、印加電圧の増加にしたがって電流は大きくなる。電圧が印加されてから、約 2.5  $\mu$ s の時間で立ち上がり、ピークに達したあと、定常電流となる。印加電圧の終了とともに、所定の時定数をもって電流も流れなくなる。酸素ガスにおいて、印加電圧 10kV のとき、定常電流は約 6.2A 流れる。また、窒素ガスでは、印加電圧 10kV のとき、定常電流は約 5.2A 流れることがわかる。しかしながら、酸素ガスおよび窒素ガスにおいて、8 kV 以下では同程度の電流

量であることがわかる。このことから、同じ印加電圧でも高電圧になるほど、定常電流に差が出るのがわかる。これは、ガス種による二次電子放出率の違いによるものだと考えられる。

外部プラズマ（RFバーストプラズマ）と自己点弧プラズマの二重構造のプラズマで得られた電流波形では、初期にピークを持ち、減少ののち、定常となる電流波形となる。この初期にピークを持つ電流はRFプラズマによるものであり、そののちの電流は自己点弧プラズマによるものである。<sup>11)</sup>

自己点弧プラズマのみでプラズマを生成させた電流波形では、印加電圧のオーバーシュート部分でプラズマが生成され、その間に電流波形が立ち上がり定常電流を示すことが確認された。

窒素ガスおよび酸素ガスの自己点弧プラズマ生成について、0.8kVでは自己点弧プラズマの点灯は観察されなかった。4kV以降では、明確な自己点弧プラズマの生成が観察された。電流値が、0.26A流れたとき目視で自己点弧プラズマの発光が観察され、さらに電流値を増加させることで、強い発光が観察された。<sup>9)</sup>

本実験において、酸素ガスおよび窒素ガスともに印加電圧は2kV以上としているので、自己点弧プラズマにおいてプラズマが生成されている範囲でシース内イオン密度の算定を行った。この結果を、酸素ガスおよび窒素ガスの算定結果を Fig. 7に示す。算定方法については、2.3に示すとおりである。

この結果から、酸素ガス及び窒素ガスにおいてシース内イオン密度が算定されることが示された。また、印加電圧を増加させることで、シース内イオン密度が増加していることが示された。印加電圧10kVにおいて、酸素ガスでは、シース内イオン密度は $48 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ であった。また、窒素ガスでは、シース内イオン密度は $59 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ であった。

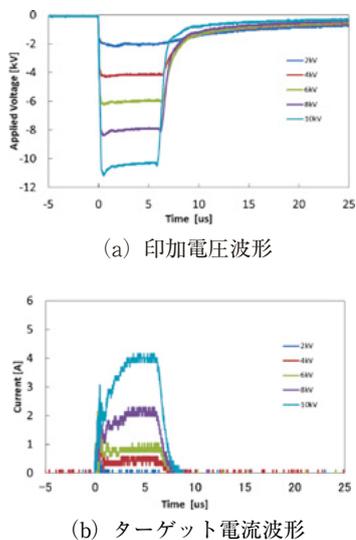


Fig. 5 取得されたターゲット電流および印加電圧波形（窒素）

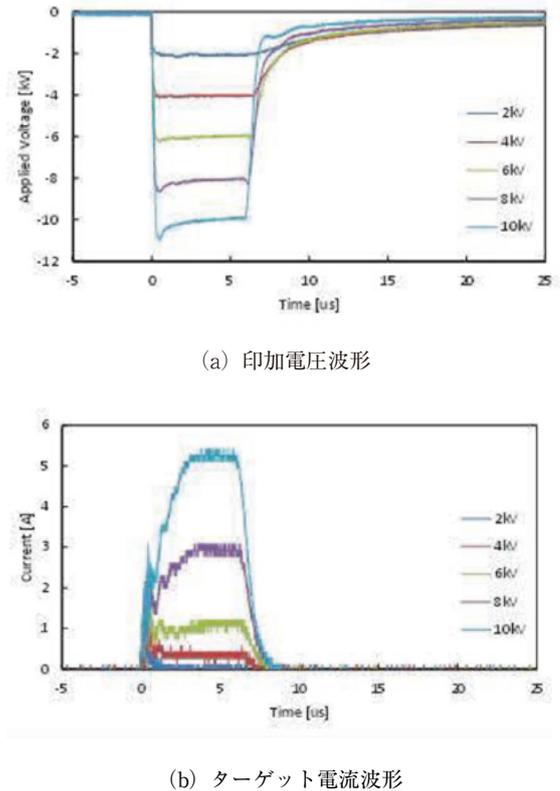


Fig. 6 取得されたターゲット電流および印加電圧波形（酸素）

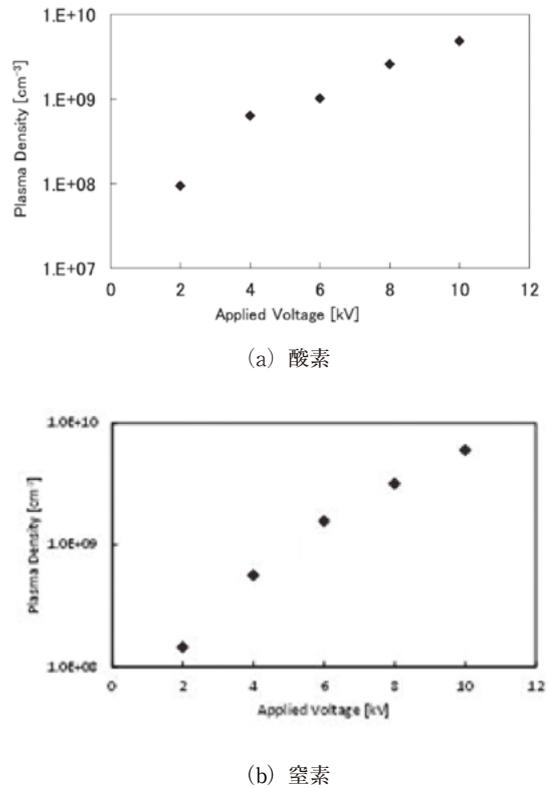


Fig. 7 シース内イオン密度算定結果

### 2.5.2 圧力依存性

圧力を変化させたときの自己点弧プラズマのシース内イオン密度の算定を行う。自己点弧プラズマによるターゲット電流および印加電圧波形を、酸素ガスについては Fig. 8 に示し、窒素ガスについては Fig. 9 に示す。それぞれの印加電圧波形を見ても、酸素ガスおよび窒素ガスともに、圧力が高い時 (10Pa) は立ち下がりが鋭くなっているのに対して、圧力が低くなっていくことで立ち下がりが緩やかになっているのがわかる。この、立ち下がりの違いによってシース内イオン密度が変わってくると考えられる。

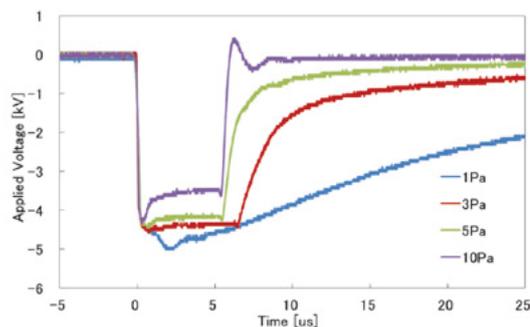
このときの電流波形を見ても、印加電圧を 4 kV と一定としても、圧力が高くなると、電流量が増加していることがわかる。これは、圧力が高くなることで初期密度が異なるため、その違いにより、電流量が違うと考えられる。チャンバー空間にある電荷が、電流に変化したものだと考えられる。

印加電圧を増加させたときと同様に、圧力を増加させたことで、電流量は増加し、10Pa において酸素ガスと窒素ガスでは約 2 A の電流量の違いがみられた。これは、ガス種の違いによるものだと考えられる。

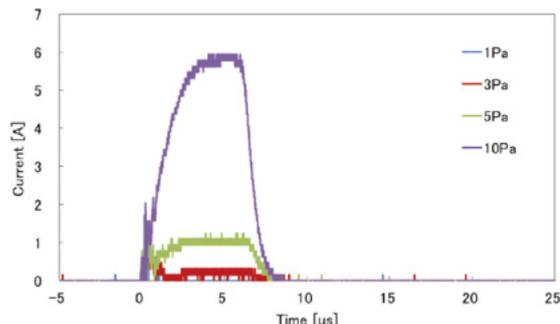
圧力を変化させたとき、圧力が高くなるほど自己点弧プラズマの点灯に必要な電圧値が小さくなっている。圧力が高いほど、初期密度が多いため低い電圧値でのプラズマ生成が可能だと考えられる。自己点弧プラズマにおいて、圧力が高いほうがプラズマ点灯に必要な電圧値が低いことが示唆された。<sup>9)</sup>

圧力を変化させたときの自己点弧プラズマによるシース内イオン密度の算定結果を、酸素ガスおよび窒素ガスについて Fig. 10 に示す。印加電圧波形からみてわかるように、立ち下がりが鋭いほうがシース内イオン密度は高くなるため、そのように算定結果にも表れている。

酸素ガスおよび窒素ガスにおいて、圧力を上昇させることによってシース内イオン密度は増加していることが示された。これは、初期密度の違いによるものだと考えられる。

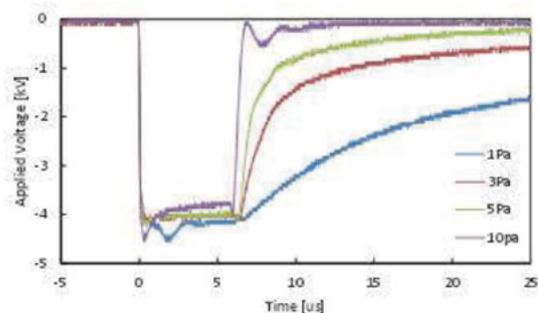


(a) 印加電圧波形

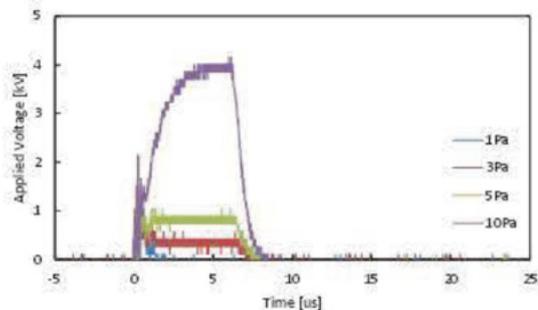


(b) ターゲット電流波形

Fig. 8 圧力を変化させたときのターゲット電流および印加電圧波形 (酸素)

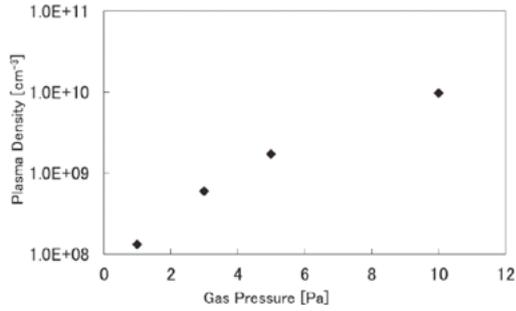


(a) 印加電圧波形

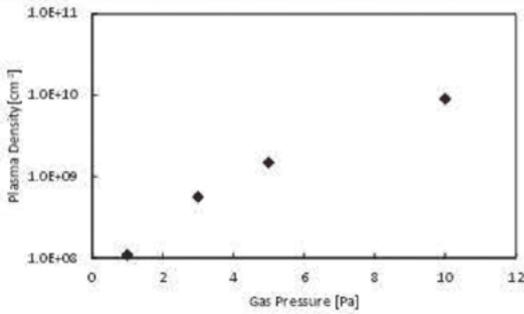


(b) ターゲット電流波形

Fig. 9 圧力を変化させたときのターゲット電流および印加電圧波形 (窒素)

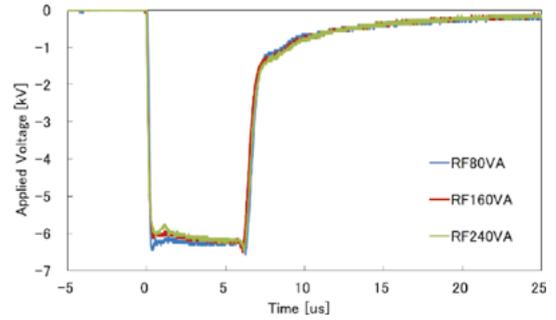


(a) 酸素

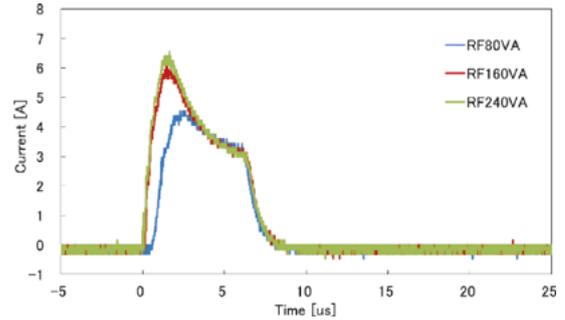


(b) 窒素

Fig. 10 圧力依存性によるシース内イオン密度算定結果



(a) 印加電圧波形



(b) ターゲット電流波形

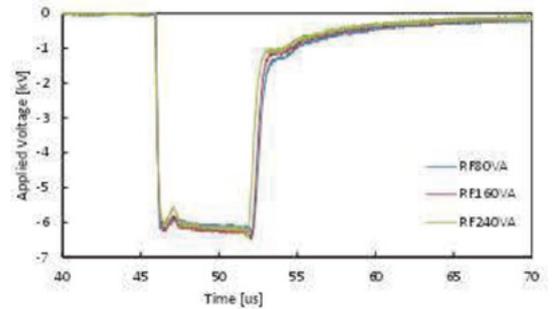
Fig. 11 RF 電力依存性によるターゲット電流および印加電圧波形 (酸素)

### 2.5.3 RF 電力依存性

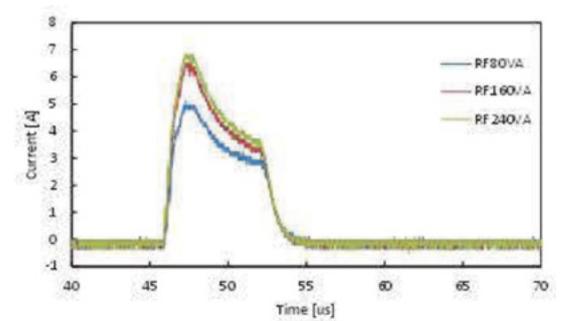
RF 電力依存性によるシース内イオン密度の算定を行う。印加電圧を 6 kV とし RF 電力を 80VA、160VA、240VA と変化させたときの印加電圧波形およびターゲット電流波形を、酸素は Fig. 11 に示し、窒素ガスは Fig. 12 に示す。RF 電力を用いたとき、印加電圧波形は立ち上がりの直後に少し戻っている。この部分は、ターゲット電流波形の立ち上がり部分と一致している。自己点弧プラズマによるものと違い、RF プラズマによるターゲット電流波形は、初期にピークを持ち、そののち緩やかに減少していき印加電圧の終了とともにターゲット電流も終了している。この初期にピークを持つ部分が RF プラズマによるイオン電流だと考えられる。<sup>13)</sup>

RF 電力を用いたときのシース内イオン密度の算定結果を、酸素ガスおよび窒素ガスによるものを Fig. 13 に示す。自己点弧プラズマを用いたときに比べて、RF 電力を用いたほうが酸素ガスおよび窒素ガスともにシース内イオン密度が多少増加していることがわかる。

RF 電力でも多少の変化がみられたのは、80VA と 240VA では、バースト波形において違いがみられたため、プラズマの状態にも違いがみられたものだと考えられる。

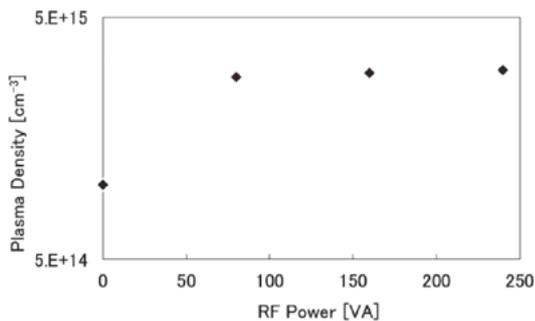


(a) 印加電圧波形

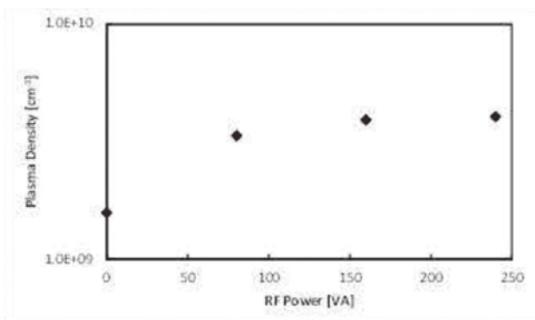


(b) ターゲット電流波形

Fig. 12 RF 電力依存性によるターゲット電流および印加電圧波形 (窒素)



(a) 酸素



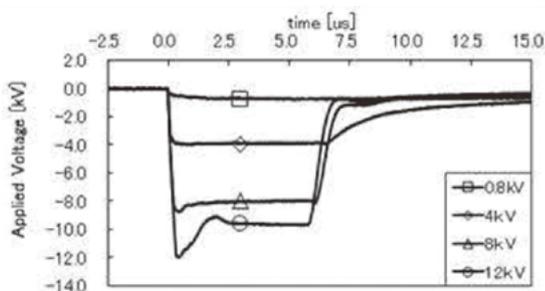
(b) 窒素

Fig. 13 RF 電力を用いたときのシース内イオン密度算定結果

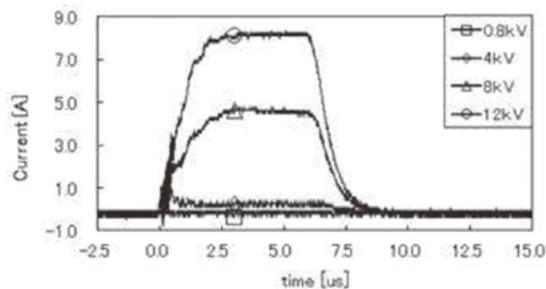
### 2.5.4 二次電子放出率

Fig. 14に窒素のターゲット電流および印加電圧波形を示す。4 kV 以下では明確な電流波形を観測することはできなかった。8 kV 以上では明確な電流波形であり、印加電圧の増加に伴い、電流波形の立ち上がり時間が短くなることが観察された。印加電圧 8 kV において定常電流約 4.4A 流れる。

ここで、4 kV のときの電流波形では、立ち上がったのち少し下がって一定になっている。8 kV の電流波形では、パルス状の波形になっている。この波形の形状の違いには二次電子の発生が関係していると考えられる。



(a) 印加電圧波形



(b) ターゲット電流波形

Fig. 14 窒素のターゲット電流および印加電圧波形

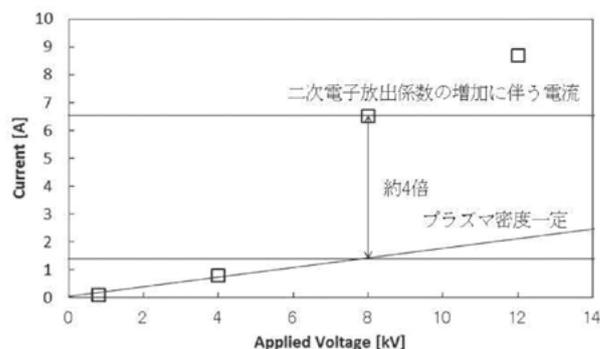


Fig. 15 窒素のターゲット電流—印加電圧特性

イオンが金属材料に衝突すると、衝突した金属から電子が放出される場合がある。これを二次電子放出といい、衝突したイオンあたり何個の電子が放出されるかを二次電子放出係数という。金属材料において、イオンのエネルギーが低い場合（1 keV 以下）では二次電子放出係数は0.1ぐらいである。イオンのエネルギーが高い場合（1 keV 以上）では、二次電子放出係数が大きくなる。20keV のときのステンレススチールでは、二次電子放出係数は4.8である。これらのデータについて、Table 1 に窒素イオン ( $N^{2+}$ ) による二次電子放出係数について示す。<sup>14)</sup>

ターゲット電流波形を見てみると、4 kV のときでは初期にピークを持ち、そののち電流波形が下がっているため、イオンのエネルギーが低く、二次電子の放出があまりないと考えられる。次に、8 kV のときでは、初期にピークを持たず、増加したのち一定となっている。これは、二次電子放出によるものだと考えられる。ここで、Fig. 15に窒素のターゲット電流—印加電圧特性を示す。6 kV 以上においてターゲット電流が直線的に増加していることがわかる。プラズマ密度をほぼ一定と仮定すると 9 kV において、プラズマ密度をほぼ一定と仮定したときと実際のターゲット電流では約 4 倍の違いがみられ、ターゲット電流の約 2/3 は二次電子放出の増加に起因するものだと考えられる。

Table 1 窒素イオン ( $N^{2+}$ ) による2次電子放出係数

Material	Energy		
	20keV	30keV	40keV
SS304	4.8	6.2	7.3
Copper	3.9	4.9	6.1
Ti-6 Al-4 V	5.0	6.2	7.7
Graphite	8.6	10.8	...
Al (oxidized)	14.5	18.5	...
Al (etched)	15.8	16.9	19.1

これらのターゲット電流値をもとに、各電圧の初歩的な二次電子放出係数の値の仮定を行い、印加電圧の増加に対するシース内イオン密度の算定の補正值として Fig. 16に示す。

式(12)を用いて印加電圧に対するシース長の計算結果を、プラズマ密度をパラメータとして計算した結果を図 3.17に示す。ここで、パルス幅は $6.3\mu s$ として計算を行った。求めたプラズマ密度の値を Fig. 17上に表示す。シース長は同程度のものだと考えられる。

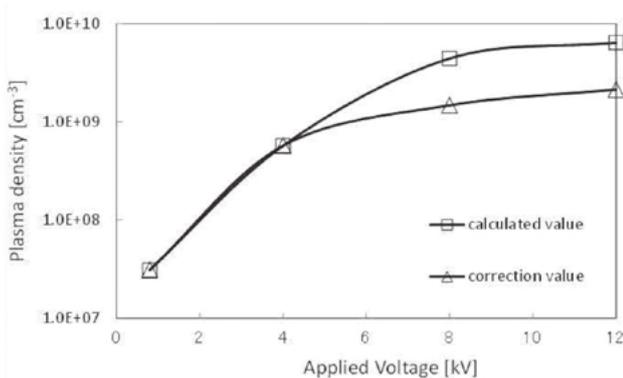


Fig. 16 シース内イオン密度の補正值

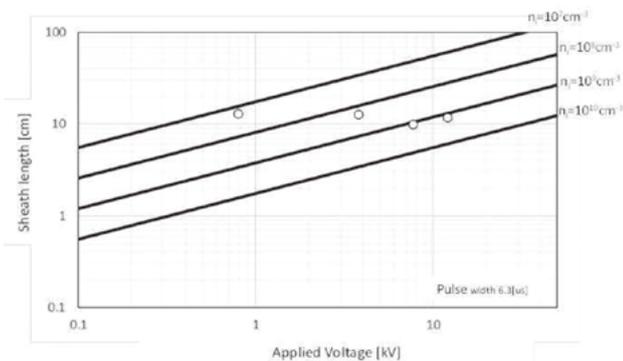


Fig. 17 シース長—印加電圧の関係

### 3 まとめ

PBII法においてモジュレータ等価回路を基礎として、シース内イオン密度を求めることができた。PBII法において、滅菌プロセスで使用される自己点弧プラズマを形成し、取得した放電電流—高圧電圧波形からプラズマ密度およびシース長の算定を行うことができた。この方法を用いて、プラズマ密度、シース長等の今後装置設計するとき重要なパラメータの一部を求めることができた。

印加電圧の増加または圧力を増加させることで、シース内イオン密度が増加することが示された。また、RF電力と併用することで、自己点弧プラズマと比較してシース内イオン密度の増加が示された。

今後、滅菌装置設計などのプラズマを用いた装置設計に、本手法を活かすことができる可能性が示唆された。

### 謝 辞

本報告書は、広島工業大学大学院工学系研究科電気電子工学専攻の大学院生である、藤村信幸君、下野和洋君、および野口央照君との共同研究を実施し、論文作成、国際会議や国内会議の発表を中心にまとめており、それらをまとめた大学院生の修士論文を中心に構成されています。広島工業大学内での、研究をまとめるにあたって数々の有益な討論、協力を頂いた広島工業大学生命学部教授博士（工学）角川幸治先生に深く感謝の意を表します。

### 文 献

- (1) 行村 建：放電プラズマ工学，オーム社（2008）
- (2) M.Nagatsu：J. Plasma Fusion Res., Vol.83, No.7, pp.601-606（2007）
- (3) R. Yoshida, H. Kobayashi: "New Findings on Hydrogen Peroxide Gas Sterilisation", Japanese Association for Operative Medicine, Vol.33, No.3, pp273-284（2012）
- (4) T. Tanaka, T. Hironaka, S. Hayashi, I. Koyama: "Disinfection and sterilization by using plasma-based ion implantation" ELEKTROTECHNICA & ELEKTRONICA E + E, 47（2012）268.
- (5) S. Isobe: "Advanced Micro-organism Control System with Non-thermal Processing", Jpn. J. Food Microbiol, Vol.27, No. 3, pp.115-122（2010）
- (6) J.R. Conrad, J.L. Radtke, R.A. Dodd, F.J. Worzala, N.C. Tran：J. Appl. Phys. 62, 4591（1987）
- (7) R.J. Adler, S.T. Picraux：Nucl. Instr. Methods Phys. Res, B6, 123（1985）
- (8) 行村 建：表面技術，Vol.52, No6, pp.438-441（2001）
- (9) 電気学会・プラズマイオン高度利用プロセス調査委員会：

- プラズマイオンプロセスとその応用、オーム社(2005)
- (10) 行村 建, WEI Ronghua: プラズマイオン注入・堆積法の新しい展開, J. Plasma Fusion Res. , Vol.80, No.4 (2004) 281
- (11) S.Teii: J. Vac. Soc. Jpn., 31, pp214-222 (1988)
- (12) K.Nakamura: J.IEE Japan, Vol.121, No. 5 , pp320-321 (2001)
- (13) 行村 建: 放電プラズマ工学, オーム社 (2008)
- (14) K. Yukimura, WEI Ronghua: "A New Trend of Plasma-Based Ion Implantation and Deposition", J. Plasma Fusion Res, Vol.80, No. 4 , pp281 (2004)