

## マイクロ波イオン源の実ガス評価

### EVALUATION OF A MICROWAVE ION SOURCE WITH MATERIAL GASES

村田裕彦<sup>#A)</sup>、高橋伸明<sup>A)</sup>、曾我知洋<sup>A)</sup>、三堀仁志<sup>A)</sup>、青木康<sup>A)</sup>、櫻庭順二<sup>A)</sup>、加藤隆典<sup>A)</sup>、池永訓昭<sup>B)</sup>、  
作道訓之<sup>B)</sup>

Hirohiko Murata<sup>#A)</sup>, Nobuaki Takahashi<sup>A)</sup>, Tomohiro Soga<sup>A)</sup>, Hitoshi Mitsubori<sup>A)</sup>,  
Yasushi Aoki<sup>A)</sup>, Junji Sakuraba<sup>A)</sup>, Takanori Kato<sup>A)</sup>, Noriaki Ikenaga<sup>B)</sup>, Noriyuki Sakudo<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Sumitomo Heavy Industries

<sup>B)</sup> Kanazawa Institute of Technology

#### Abstract

Sumitomo Heavy Industries, Ltd. has been developing 2.45GHz microwave ion source for an ion implanter since 2011. First, we investigated magnetic field characteristic using Ar plasma and built the ion source for material gas on the basis of the result. It was installed on the test stand and beam test was performed using a BF<sub>3</sub> gas. Beam current of B<sup>+</sup> and BF<sub>2</sub><sup>+</sup> was 10mA and 24mA respectively, and yield was 20% and 70% respectively. It is likely that electron temperature of microwave ion source is quite low when compared with a B<sup>+</sup> yield, 40% of IHC ion source. At the beginning of test, magnetron plasma was generated outside the plasma chamber because of an intersection of the electric field and the magnetic field in the vacuum. It is suppressed by installing an alumina cylinder and the ion source is in operation without any problems. BN is deposited around the beam aperture during the beam test. It's considered to be due to the BN cover inside the plasma chamber. We will plan to evaluate the other material.

#### 1. はじめに

CMOSFET のトランジスタはイオン注入機によりソースやドレインに P 型ドーパント(B<sup>+</sup>, BF<sub>2</sub><sup>+</sup>)や N 型ドーパント(P<sup>+</sup>, As<sup>+</sup>)を注入し、トランジスタを形成している。現在イオン注入機で使われるイオン源は間接加熱カソード型(Indirect Heated Cathode, IHC)イオン源であるが、フィラメントやカソードなどの消耗品により寿命が決まってしまう。使い方もよるが、二週間程度でメンテナンスが必要になる。生産性の向上にはできるだけ長寿命が望まれる。

住友重機械ではイオン注入機、特に低エネルギー高電流装置向けのイオン源の長寿命化を目指し、マイクロ波イオン源の開発を 2011 年より行っている。マイクロ波イオン源は無電極放電のためフィラメントのような消耗品はないので長寿命化が期待できる。Table 1 にマイクロ波イオン源の開発目標を示す。

Table 1: Goal of Ion Source

B <sup>+</sup> ビーム電流	30mA
BF <sub>2</sub> <sup>+</sup> ビーム電流	24mA
P <sup>+</sup> ビーム電流	42mA
As <sup>+</sup> ビーム電流	36mA
イオン源寿命	720 時間
収率	各イオン 50%

Beam Current at 40kV of Beam Energy

半導体製造用ガス(実ガス)を用いた評価に先立ち Ar プラズマによる評価を行った[1]。高密度プラズマが生成できる磁場分布を決定し、この評価結果を元に実ガス用イオン源を設計・製作した。ビーム評価はイオン注入機メーカーである(株)SEN(愛媛県西条市)所有の IHC イオン源試験装置(ソーステストスタンド)に搭載して行った。本稿では BF<sub>3</sub> ガスを使用して行った B<sup>+</sup>、BF<sub>2</sub><sup>+</sup>ビーム試験の評価結果と試験で発生した諸問題について報告する。

#### 2. 装置紹介

##### 2.1 マイクロ波イオン源

Fig.1 に据え付け前のマイクロ波イオン源を示す。プラズマチャンバーとソレノイドコイルはソーステストスタンドの真空チャンバー内に設置される。プラズマチャンバーは高電位、ソレノイドコイルは接地電位となる。プラズマ生成室はφ86mm x 76mm とした。プラズマチャンバーの一部は BN 材で埋めており、その長さはマイクロ波パワーの反射率が最小になるように COMSOL Multiphysics[2]を使って求めた。決定された長さは 90mm でその時の反射率は 17%だった。真空窓にはアルミナを用いており、この BN 材はプラズマチャンバー内への逆流電子からアルミナを保護する役目も持つ。

ソレノイドコイルは巻線にホロコンを用いた。それを二個で 1 セットとしている。コイルは脱ガスを極力低減させるため、アルミのケース内に収めてアラルダイトによりモールドした。コイルは各々電源を持ち独立に励磁電流を設定できる。最大電流は

<sup>#</sup> Hrh\_Murata@shi.co.jp

400A である。この時コイル中心では最大 1.5kG を発生させることができる。

マイクロ波源はマグネトロンにより最大 1kW を出力できる。イオン源と同電位に設置され、マイクロ波出力はアイソレーター、方向性結合器を通してイオン源に入力される。



Figure 1: Microwave ion source.

## 2.2 ソーステストスタンド(STS)

Fig.2 に STS の真空チャンバーと STS に取り付けられたマイクロ波イオン源を示す。真空チャンバーの左側面にイオン源が取り付けられ、右側がビームダンプである。質量分析機能は持たないが、ビームダンプに質量スペクトルを計測するための小型アナライザーマグネットを持ち、ダンプに開けられた小孔を通してビームの一部を取りこみ質量スペクトルを計測する。但し magnetic rigidity が 0.09Tm と低いいため、計測範囲に合わせて引出電圧を変える必要がある。

引出電圧は最大 60kV まで印加できる。またサブレーション電極、接地電極は一体型になっており、イオン源に対してアライメント調整が可能である。

可動スリットとワイヤーから成る x,y エミッタンスモニターも持つ。これはビームのプロファイルを計測する際にも用いられる。



Figure 2: STS vacuum chamber (Left) and ion source installed on STS (Right).

## 3. ビームテスト結果

STS では排気能力がやや低い上にアナライザーマグネットまで約 1.2m あるため、引き出された分子イオンが中性ガスとの衝突により解離を起こす。今回の評価では  $\text{BF}_3$  ガスを使った評価でそれが顕著に現れた。 $\text{B}^+$ ビームの質量スペクトルの例を Fig.3 に示す。

図中矢印で示した 2.47、4.03、7.37、18.4 に現れるピークは  $\text{BF}_2^+$ や  $\text{BF}^+$ として引き出され、 $\text{B}^+$ や  $\text{F}^+$ 、 $\text{BF}^+$ に解離したビームのピークである。 $\text{BF}_2^+$ ビーム電流量の算出には解離したイオンのピークも  $\text{BF}_2^+$ とした。

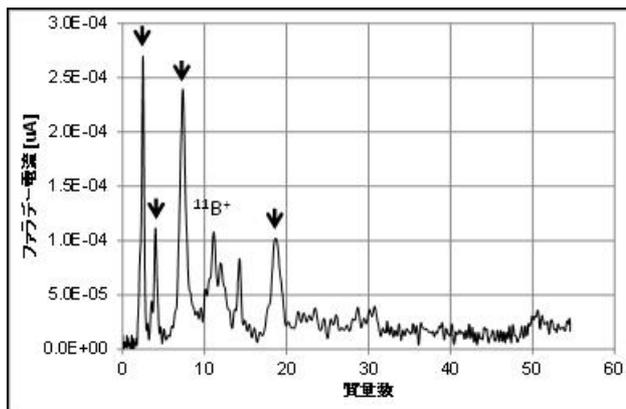


Figure 3: Example of  $\text{B}^+$  Beam spectrum. The peaks indicated by the arrows are the ones of the dissociated ions.

Fig.4a, b に  $\text{B}^+$ と  $\text{BF}_2^+$ のビーム電流量、収率のガス流量依存性を示す。ガス流量の増加とともに  $\text{B}^+$ ビームは減少し、 $\text{BF}_2^+$ ビームは増加している。これはチャンバー内のガス圧増加による電子エネルギーの低下により、 $\text{B}^+$ イオンの生成量は減少し、 $\text{BF}_2^+$ イオンの生成が増加するためと考えられる。

Fig.4b に示すように  $\text{BF}_2^+$ のビーム電流量及び収率は引出電圧 40kV、マイクロ波パワー500W、ガス流量 5ccm で 24mA、70%を達成した。

一方で  $\text{B}^+$ ビームはマイクロ波パワー800W、ガス流量 1ccm で 10mA、20%であった。これはマイクロ波プラズマの電子温度が低いことが一因と考えられる。Ar プラズマでのラングミュア-プローブ測定によると平均の電子温度は 2~3eV であった。 $\text{BF}_3$  の B-F 結合は生成エンタルピーから計算される結合エネルギーが 6~7eV と高く、この結合を切断するのに十分なエネルギーを持った電子が少ないものと思われる。IHC イオン源の 40%に比べて  $\text{BF}_2^+$ の収率がかなり高いので、 $\text{BF}_3$  プラズマにおいても電子温度がとても低いことが考えられる。更に  $\text{B}^+$ ビーム電流を増やすために電子温度を上げることが必須と考えられる。

Fig.5 はコールドスタート時のビーム安定性である。朝、装置停止状態からパラメーターを設定してビームを出した後放置し、ビームがどれ位の時間で安定するかを見た。マイクロ波出力 200W、ガス流量 1ccm で引出電圧 20kV でビームを引き出した。約 20 分後に引出電流が安定になり、その後の変動は 1%以下だった。イオン注入機の生産性向上には素早いビームの安定性が求められ、目標は 30 分以内としている。本データは全引出電流についてのものであるが、 $\text{B}^+$ 、 $\text{BF}_2^+$ ビームの安定性についても同様な安定性が得られると考えている。

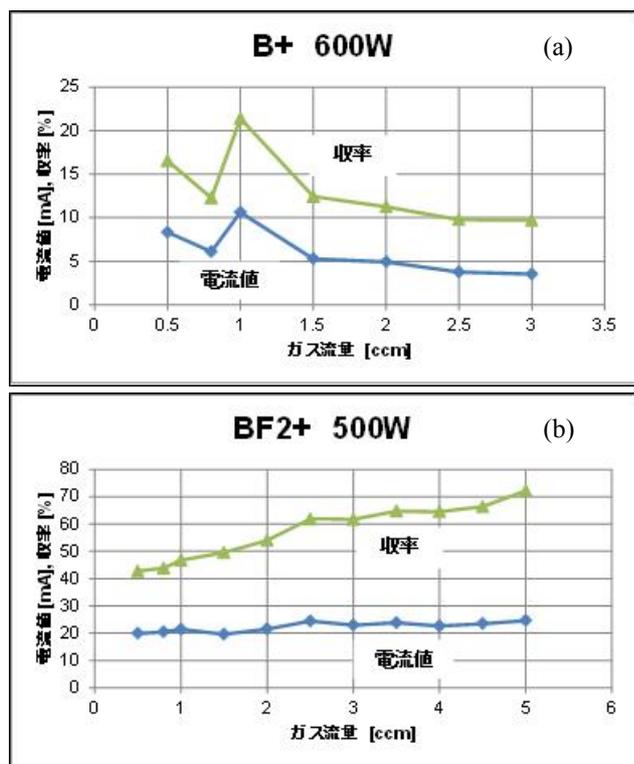


Figure 4: Gas flow dependence of beam current and yield of (a)B<sup>+</sup> and (b)BF<sub>2</sub><sup>+</sup>.

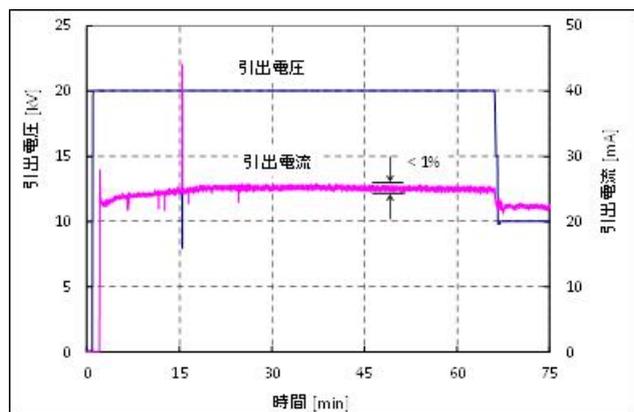


Figure 5: Beam stability at the cold start.

#### 4. 問題

今回の評価では、主に次の二つが問題となった。一つは放電に関するものである。ソレノイドコイルが真空チャンバー内なので評価開始当初、プラズマチャンバー内にプラズマが生成していなくても、磁場と引出電圧を印加し、ガスを流すとコイルとイオン源チャンバーとの間で薄いプラズマが発生し、引出電圧の上昇とともに電流が急増して引出電源が過電流で落ちてしまった。この薄いプラズマは、プラズマチャンバーとコイル間の電界とソレノイド磁場が交差したことにより、そこに存在する電子が ExB ドリフトをし、空間の中性ガスを電離させるマグネトロン放電によるものである。この対策として、プ

ラズマチャンバーの周りにカプトンシートを巻いて放電を抑制しようとしたが、テストの最中にカプトンの表面に周方向に放電痕が出来、絶縁破壊を起こして電圧が掛けられなくなった。継続的な電子衝撃によりカプトンが劣化し、絶縁破壊を起こしているものと思われる。

現在はカプトンに代えてアルミナセラミックスの円筒に変更した。これによりプラズマチャンバーとコイル間の放電は抑止され、ビーム評価を安定に行うことができるようになった。

もう一つの問題は BF<sub>3</sub> ガスを使ってビーム運転を行っているチャンバー内に堆積物が生成することである。これが引出開口部に付着する。この堆積が続くと開口を塞ぐことになり、やがてビームを引き出すことができなくなってしまう。この堆積物を採取し、XRD 分析を行った。分析結果を Fig.6 に示す。文献[3]より開口周辺にできている堆積物は BN の多結晶であると考えられる。BN カバーが F に侵食され、それが開口周辺部に堆積していると考えられる。対策としてはチャンバー内での BN 使用を止め別の材質に変更して評価する予定である。

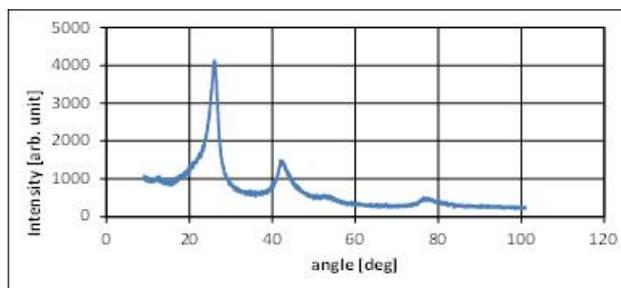


Figure 6: XRD analysis result of deposition of the ion source.

#### 5. まとめ

実ガス用マイクロ波イオン源を製作し、B<sup>+</sup>ビームと BF<sub>2</sub><sup>+</sup>ビームの評価を行った。BF<sub>2</sub><sup>+</sup>ビーム電流は 24mA を引き出すことができ、取率とともに目標を達成できたが、B<sup>+</sup>ビーム電流は 10mA であった。これは電子温度が低く BF<sub>3</sub> の解離が進まないためと考えられる。コールドスタートの安定性は約 20 分であった。

ソレノイドコイルを真空中に入れたことによりプラズマチャンバー外でマグネトロン放電が発生した。現在アルミナの筒を装着してこれを抑制し安定にビーム運転できるようになった。ビーム運転中に引出開口周辺に BN の堆積物が付着する。これは使用材質を BN ではなく他の材質に変更して評価を行う予定である。

今後電子温度を上げる対策を実施し、B<sup>+</sup>ビーム電流の増強を図り、更に P<sup>+</sup>、As<sup>+</sup>ビーム評価を行う予定である。

## 謝辞

本実験を行うにあたって、(株)SEN の川口宏氏と永井孝幸氏とは多くの有用な議論を行い、貴重なご意見を頂きました。また SEN の評価と現場スタッフの皆様にはテスト環境の整備をして頂き、また装置運用に不慣れな我々に対し、忙しい中時間を割いて対応いただきました。この場をお借りして、皆様に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] N. Takahashi, et. al., “Development of microwave ion source for industrial applications”, Rev. Sci. Instrum., vol.85(2), 02C306, 2014.
- [2] COMSOL Multiphysics, website : <http://www.kesco.co.jp/comsol/index.html>
- [3] S. Matsumoto, et. al., “Preparation of BN films by rf thermal plasma chemical vapour deposition”, J. Mater. Sci., vol.31(3), pp.713-720, 1996.