電子ビーム加熱生成ガドリニウム蒸気中の荷電粒子の除去*

大場 弘則**・有沢 孝**・西村 昭彦**

小倉 浩一**・柴田 猛順**

(受付1991年12月2日, 掲載決定1992年2月8日)

Removal of Charged Particles in Gadolinium Atomic Beam Generated by Electron Beam Heating

Hironori OHBA**, Takashi ARISAWA**, Akihiko NISHIMURA**,
Koichi OGURA**, and Takemasa SHIBATA**

(Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki)

(Received December 2, 1991, Accepted February 8, 1992)

1. はじめに

電子ビーム加熱蒸発では高密度の原子ビームを容易に作ることができるが、蒸発部で電子ビームによる原子のイオン化によりプラズマが発生する¹⁾。この原子ビームを原子衝突実験等に用いるとき、蒸発部生成プラズマが原子ビームとともに上昇し衝突実験部に流入すると、衝突で生成したイオンや電子の計測が困難となる。原子法レーザー同位体分離でも電子ビーム加熱で生成した原子ビームにレーザー光を照射し目的同位体のみイオン化して電極に回収する²⁾が、蒸発部で生成したイオンが回収部に流れ込むと同位体分離ができなくなる。このため、衝突実験部や同位体分離でのイオン回収部の下方で蒸発部生成プラズマを除去する必要がある。これまで抵抗加熱のつぼで生成した原子ビームで衝突実験を行う場合、蒸発部と測定部の間に除去電極を入れ、これに正負の電位を印加して熱電離イオンが計測部に入らないようにしている³⁾。著者等も電子ビーム加熱で生成した原子ビームでレーザー同位体分離実験を行うとき二枚の平行な除去電極に正負の電位を印加して荷電粒子の除去を行ってきた。しかしながら、原子ビームの密度を上げていく

と、印加電圧を高くしても荷電粒子の除去ができなくなった。一方、二枚の除去電極に負の電圧を印加してアース電位程度のプラズマからイオンを除去電極に引き込み、蒸発部生成プラズマを除去電極内で消滅させることを試みたところ、高密度原子ビームの場合でも荷電粒子の除去ができそうなのことがわかった。そこで、ここでは電子ビーム加熱蒸発で生成したガドリニウム原子ビーム中の荷電粒子を一对の平行平板電極を用いて除去する実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 実 験

実験装置概略を Fig. 1 に示す。電子ビームにより水冷銅のつぼ内のガドリニウムを加熱蒸発させた。蒸発面から345 mm の位置に間隔15 mm の一对の平行平板でできた除去電極 (80 mm×50 mm) を設けた。電極直上においてラングミュアプローブ (直径0.7 mm, 長さ3 mm) に-100 V を印加しながら残留イオン量を測定して荷電粒子が除去できたかどうか判断した。蒸着速度を蒸発面から973 mm の位置に設けた水晶振動了膜厚計で測定し、これよりプローブ位置での原子密度を推定した¹⁾。測定は電子ビーム入力1~4 kW の範囲で行った。

3. 結 果

除去電極に正電位を印加すると、片側のみでも両側に

* 平成3年11月1日 第32回真空に関する連合講演会で発表 (1Bp-3)

** 日本原子力研究所 (〒319-11 茨城県那珂郡東海村)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

印加した場合でも同様の結果が得られた。電極両方に正電位を印加した場合の実験結果の一例を Fig. 2 に示す。原子ビーム密度の低いところでは、数 V の正電位を除去電極に印加すると荷電粒子の除去ができた。しかしながら、原子ビーム密度が高い場合は数 V までの印加電圧ではイオン量の減少が見られるが完全に除去できず、印加電圧をさらに高くすると残留イオンが増加する傾向がみられた。しかも除去電極には加熱用電子ビーム電流と同程度の 0.2 A という大きな電流が流れた。さらに加熱用電子ビーム入力を増大させ、原子ビーム密度を $1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ まで増加させると除去電極電流は 0.5 A にまでなった。また電子銃加速部での放電も多発し、電子ビーム加熱が定常的にできなくなった。

一方、両電極に負電圧を印加する方法では、Fig. 3 に示すように高い原子ビーム密度でも数 10 V で除去できた。しかもこのときの除去電極電流は数 mA で正電圧印加時に比べ 100 分の 1 程度であった。このことから荷電粒子除去は電極両方に負電位を印加する方法が有効であることがわかった。Fig. 4 は荷電粒子除去に必要な電極電位を示すが、原子ビーム密度が高くなり除去すべきプラズマのイオン密度が高くなるほど高い負電圧を印加する必要があることがわかる。

4. 考 察

除去電極の片側または両方に正電位を印加した場合、原子ビーム密度を高くすると荷電粒子除去ができなくな

Fig. 2 Removal characteristics of the charged particles when both removal electrodes were biased to positive potential.

Fig. 3 Removal characteristics of the charged particles when both the removal electrodes were biased to negative potential at Gd atomic beam density of $8.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. Input power: 3 kW. Deposition rate: 20.2 Å/s .

り、除去電極には 0.2~0.5 A の電流が流れた。これは電子ビームで加熱された高温の蒸発部が陰極、除去電極が陽極となって陰極と陽極の間にアーク電流が流れ、これによる電離で原子ビーム中の荷電粒子量が増加するためと思われる。

一方、電極両方に負電位を印加する方法では高密度の原子ビーム中でも荷電粒子が除去できた。このときの荷電粒子除去の様子を Fig. 5 に示す。ガドリニウム原子ビームとともに上昇する荷電粒子の作るプラズマからイオンが引出されてプラズマと電極の間の間隔（シース）

Fig. 4 Gd atomic beam density vs electrode potential that are required to remove the charged particles in the atomic beam when both the electrodes were negatively biased. Open circle: Experimental data. Broken line: Estimated value.

が除去電極を通過するまでに成長してプラズマが消滅すれば荷電粒子は測定部に流れ込まない。必要な除去電極電位を次のようにして推定した。

荷電粒子の作るプラズマは蒸発部とつながっているので電位はアース電位に近い。プラズマから負電位の除去電極に空間電荷制限電流で決まるイオン電流が流れる。プラズマはガドリニウム原子ビームとともに上昇しながらボーム速度 v_B 程度で膨張する。プラズマと電極との間隔（シース）の減少と増大は空間電荷制限イオン電流密度 (i_{space}) とプラズマの膨張に相当するイオン電流密度 ($i_{expa} = v_B \cdot n_i$) の大小により次のようになる。

$i_{space} = i_{expa}$ ならばシースは一定

$i_{space} < i_{expa}$ ならばシースは減少

$i_{space} > i_{expa}$ ならばシースは増大

ここで、 n_i はイオン密度である。このメカニズムは、二枚の電極間にレーザー等によりパルス的に生成したプラズマの消滅過程のメカニズム^{4,5)}と同様である。Fig. 6 は蒸着速度 $22 \text{ \AA/s}$ 、原子ビーム密度が $8.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ の場合について必要除去電極電位の推定値が -66 V であることを示す図で、除去電極下端のプラズマから負電位の両電極にイオンが流れ出したときのプラズマのイオン密度、プラズマの幅を計算したものである。このとき除去電極下端部に入るプラズマの膨張速度を決める電子温度は円筒プローブで測定した値、除去電極下端でのプラズマのドリフト速度は飛行時間法で測定した値、またイオン密度は平板プローブでの測定値とドリフト速度から

Fig. 5 Removal mechanism of the charged particles in the atomic beam when both the removal electrodes are negatively biased.

- ① The plasma flows upward with the atomic beam.
- ② The plasma expands with the Bohm velocity.
- ③ Ions given by the Child-Langmuir formula for space-charge-limited current are extracted from the plasma to negatively biased electrodes and the plasma shrinks.

Fig. 6 One example of calculations of ion density and plasma width between the removal electrodes after the plasma arrived at the lower end of the electrodes. At the lower end of the electrodes, the ion density is $6.5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$, the plasma drift velocity is 1250 m/s , and the electron temperature is 0.08 eV . These data correspond to measured value at the input power of 3 kW , deposition rate of $22 \text{ \AA/s}$, and the atomic beam density of $8.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. The both electrodes are biased to -66 V .

計算した値を用いた¹⁾。このときのプラズマの上昇速度は1250 m/sで、除去電極(50 mm)を通過する時間40 μsec でプラズマが消滅するように除去電極に-66 Vを印加して計算した。もし印加電圧が-66 Vより低ければ40 μsec ではプラズマは消滅しないので除去電極上部まで荷電粒子は流れ出してしまう。逆に-66 Vより高い負電圧であれば40 μsec 以下でプラズマは消滅し、荷電粒子は上部に流れ出さない。ガドリニウム原子ビーム密度に対する必要除去電極電位の計算値はFig. 4中の破線で示すように実験値とよく一致した。これはFig. 5に示す荷電粒子除去のメカニズムが実際のものに近いことを示している。

5. おわりに

電子ビーム加熱生成したガドリニウム原子ビーム中の荷電粒子除去試験を行い次の結果を得た。

原子ビーム密度の低いところでは除去電極の片側または両方に正電位を印加すれば効率よく荷電粒子が除去できた。しかしこの方法では原子ビーム密度を高くすると

イオン除去は困難となり、蒸発部が陰極、除去電極が陽極となり、除去電極には0.2~0.5 Aのアーク電流が流れてしまう。一方、電極両方に負電位を印加する方法では高い負電位とすれば高密度の原子ビーム中でも荷電粒子が除去できた。また荷電粒子をほぼ完全に除去するのに必要な電位を電子温度、イオン密度、プラズマのドリフト速度を用いて推定したところ試験結果と一致した。今後、蒸発部生成プラズマの特性がわかれば除去電極の設計ができることがわかった。

〔文 献〕

- 1) 大場弘則, 有沢 孝, 西村昭彦, 小倉浩一, 柴田猛順: 真空, **35** (1992) 本プロシーディングス.
- 2) J. A. Paisner: Appl. Phys. **B46** (1988) 253.
- 3) T. Mochizuki, M. Morikawa, and C. Yamanaka: Appl. Phys. Lett., **32** (1978) 212.
- 4) F. F. Chen: Phys. Fluids, **25** (1982) 2385.
- 5) 小倉浩一, 有沢 孝, 柴田猛順: JAERI-M, 91-222, 日本原子力研究所 (1992)