

氏 名 MICHAEL MOZJETCHKOV

学位（専攻分野） 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第351号

学位授与の日付 平成10年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 Negative hydrogen ion production by the tandem  
type microwave plasma source

論文審査委員 主査 助教授 井口 春和  
教授 金子 修  
教授 大久保 邦三  
教授 黒田 勉（中部大学）  
助教授 佐貫 平二（核融合科学研究所）

## 論文内容の要旨

Neutral Beam Injection (NBI) systems have been considered the most reliable method for plasma heating and are prospected so in the future fusion devices. However, for the beam particle energies over 100 keV, the neutralization efficiency of the positive deuterium ion beam drops below 50% and gradually decrease to zero when ion beam energy approaches 1000 keV. At the same time the neutralization efficiency for the negative hydrogen ion beam drops to 60% at 100keV and then does not change with increase of the ion beam energy. Obviously, the only way to create high-energy neutral hydrogen beams for plasma heating in the future fusion machines is the neutralization of the negative deuterium ion beam.

Compared to positive hydrogen ion sources, negative hydrogen ions production is much more complicated. The efficiency of the negative ion production determines the efficiency of the whole NBI system. That is why the development of the negative hydrogen ion sources is so important. At present hot cathode arc discharge plasma sources are used as a negative ion source for the negative ion beam-based NBI systems. Those plasma sources being very efficient and easy in construction still have some problems including filament sputtering which leads to plasma contamination and short lifetime of filaments. Because of the short lifetime, frequent maintenance of the negative ion sources is necessary and it is practically impossible in the radioactive environment of the future fusion reactors.

In this thesis I propose a new concept of the Tandem Microwave Plasma Source for negative ion production, which should eliminate those problems. I separate plasma production chamber with high magnetic field and hot non-uniform plasma from the confinement chamber where negative ion production occurs. A special reversed-field coil is eliminating residual magnetic field of the production chamber in the negative ion production region of the confinement chamber. In the production chamber high-electron-temperature plasma is ideal for the excitation of the rotational-vibrational levels of the hydrogen molecules. Those excited molecules diffuse into the confinement region. Confinement region has a low electron temperature and the process of the dissociative attachment results in the negative hydrogen ion production.

To investigate the possibility of using this new approach to the negative hydrogen ion production, I have constructed and tested a plasma source of the tandem type. Plasma source consists of two chambers: plasma production chamber (cylindrical shape, 20 cm long and 6 cm in diameter) and confinement chamber (rectangular, 26x26 cm square cross-section and 30 cm in depth). Production chamber is placed into the axial magnetic field of about 1800G and

the microwaves (2.45GHz, 5kW) are introduced through the quartz window along the magnetic field lines. Confinement chamber is surrounded by the magnetic cusp field, which is providing field-free uniform plasma area of 20x20 cm near the extraction region.

Non-uniform high-temperature plasma is generated in the production chamber and expands into the confinement chamber where it gets uniform and electron temperature decreases through the diffusion process. Plasma flux is controlled by conditioning coil around the confinement chamber, which also eliminates magnetic field from the plasma production region in the area of negative ion production.

For the input microwave power of 5 kW uniform plasma was generated with the plasma density of  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  for argon and  $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  for hydrogen in a wide rectangular area of 20x20 cm. Plasma parameters uniformity is within 3%. Electron temperature in the plasma grid region is reduced to 1 eV and with the help of the conditioning coil may be controlled in the range of 1-4 eV. To confirm the negative ion production the negative ion beam was extracted at voltage of 5kV through a single-hole (diameter 1 cm) extraction system. To measure the negative hydrogen beam, 9-channel Faraday Cup array unit was designed and manufactured. Source adjustment with continuous monitoring of negative ion beam current was carried out. Pressure of 4 mTorr and  $B=0$  at the extraction region were found optimal for the negative hydrogen ions production. Dependence of the  $\text{H}^-$  production on the magnetic field strength at the extraction grid area shows that the obtained  $\text{H}^-$  current is proportional to the plasma density when the electron temperature is constant and when the electron temperature becomes high, the  $\text{H}^-$  current decreases.

We extracted 1.0 mA negative hydrogen ion beam current from a single hole 1 cm in diameter and that corresponds to  $1.3 \text{ mA/cm}^2$  of the negative hydrogen ion current density at the plasma grid area. Considering that we have a wide uniform plasma area of 20x20-cm and input power of 5kW, total power efficiency of this ion source is higher and the operation pressure is lower than that of the conventional arc discharge and RF ion sources. The new source may be considered as an alternative for the NBI system.

## 論文の審査結果の要旨

モツェチコフ、マイケル氏の学位申請論文は、将来の大型磁場閉じ込め核融合装置における中性粒子入射加熱装置で必須とされる長時間運転、メンテナンスフリーの負イオン源の開発に関するものである。将来必要とされる数100 keV からMeV という高エネルギー領域では、正イオンビームの中性化効率が著しく減少するため従来の正イオン源を利用することができないことが知られており、LHDやJT-60U などの大型装置ではすでに負イオン源を用いた中性粒子入射加熱装置が利用され始めている。しかしながら、現在使われているアークプラズマ負イオン源は、損耗したフィラメント・カソードの交換、カソード材料によるアークチェンバー内の汚れの除去など、短期に大気解放の作業を必要とするため、トリチウムなどを扱う将来の実験装置あるいは炉においては不適であると考えられている。

論文は、メンテナンスフリーの負イオン源実用化の道を探るために、無電極マイクロ波放電を利用したタンデムタイプの負イオン源の開発を取り上げている。その原理は、比較的小容積のマイクロ波プラズマ源で励起水素分子生成に適した高密度高電子温度プラズマを生成し、大容積マルチカスプ磁場配位の閉じ込め容器に拡散させて解離付着による負イオン生成に適した低電子温度でかつ一様なプラズマを作ろうとするもので、修士課程時代に取り組んだプラズマプロセス用のイオン源を独自に改良発展させたものである。これを用いて大型負イオン源への適用の可能性を実証するために、原理の物理的理解と負イオン源としての最適化に関する実験を行った。そして、上記のアークプラズマ負イオン源の数分の1のレベルに達する $1.3 \text{ mA/cm}^2$  という水素負イオンビームの引き出しを達成した。この値は5 kW のマイクロ波入力で得られたもので、エネルギー効率ではアークプラズマ源を凌駕する可能性のあることも示した。

より具体的な研究内容として評価できる点は

(1) プラズマ生成部のチェンバーの直径を2.45 GHz のマイクロ波にとってのカットオフ長以下とするコンパクトな設計とし(直径 7 cm)、ホイッスラー波によるプラズマ生成を積極的に利用する方法を採用した。この方法で磁場強度の増大とともにプラズマ密度が増大することを実験的に確認した。負イオンの密度がプラズマ密度に比例することを考慮すれば、これらのデータは今後のプラズマ生成部の最適化設計への基礎資料となるものである。

(2) 負イオンビーム生成の最適化に関しては、補助コイルを設置することによって、カスプ磁場を生成して高速電子を除去するとともにプラズマ生成部から漏れだしてくる磁場の値を制御し、プラズマの拡散による低電子温度化、ビームの引き出し部分におけるプラズマ密度の均一化等を試みた。これらの工夫の結果、電子温度を1eV にまで下げることができ、この範囲で負イオン生成の割合が電子温度に逆比例することを実験的に確認した。また、閉じ込め容器内で磁場の値がゼロになるような位置でプラズマ密度の非一様性を数%以内に抑えることができることを示した。さらに、1次元の数値シミュレーションによっても、プラズマ生成部から閉じ込め部への拡散にしたがって負イオン生成の割合がどのように変化するかを計算した。これらの実験及びシミュレーションによって、負イオンビーム引き出し用のプラズマ源としての最適化

の基礎概念が確立された。これは、今後実用レベルの実験をするために必要なイオン源チェンバーの設計にとって重要なデータを提供するものである。

これらの実験により、無電極のマイクロ波プラズマ源を中性粒子加熱装置の負イオン源に応用するための原理実証及び基礎データを得たことは、この分野の研究の新しい展開に重要な貢献をするものと考えられる。論文審査委員会では、このような研究内容と成果は博士学位論文に値するものと全員一致で判定した。

審査委員会では、申請者本人が本論文の研究内容を口頭で説明し、これに対して詳細な質疑応答を行った。その結果、彼が本論文の研究内容に対する理解だけでなく、核融合、プラズマ工学、イオン源等に関する総合的な基礎知識を身につけていることを確認した。また、公開の論文発表会においても発表がわかりやすく、質問への回答も的確であった。これらの口頭試問、公開発表はすべて日本語で行われたが、本論文や投稿論文を英語で書いており、英語の学力に関しても十分であると認めた。