

Оптимізація геліконного джерела плазми з постійними магнітами

Ю.В. Вірко, В.Ф. Вірко, К.П. Шамрай

Інститут ядерних досліджень НАН України

Геліконний розряд збуджується в замагніченій плазмі зовнішніми антенами і підтримується хвилями-геліконами. Для ряду застосувань потрібні компактні джерела, в яких зовнішнє магнітне поле утворюється постійними магнітами, поле яких є різко неоднорідним. Раніше було встановлено, що застосування неоднорідного магнітного поля при розміщенні антени поблизу його мінімуму істотно збільшує ефективність геліконного джерела. З використанням цього явища розроблено дві різні модифікації компактного геліконного джерела з системами постійних магнітів, досліджено їх роботу в різних умовах та проведено оптимізацію.

Експериментальна установка складалась з розрядної камери діаметром 4,5 см та довжиною 19 см, сполученої з дрейфовим об'ємом діаметром 14,5 см. Розряд збуджувався двовитковою ($m = 0$) аксіально рухомою антеною, що живиться від ВЧ генератора частоти 13.56 МГц і потужності до 1 кВт. Основне магнітне поле утворювалось циліндричною радіально намагніченою системою феритових брусків довжиною 11,5 см, розташованих навколо розрядної камери на відстані 6 см від її осі. В цій модифікації в камеру дрейфу витікає конусоподібний потік плазми з густиною $\sim 4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ на відстані 7 см від вихідного отвору. Повний струм іонів становить $\sim 0,5$ А при ВЧ потужності 700 Вт та тиску аргону 3 мТорр. Джерело такого типу може бути використано для обробки матеріалів та інших технологій.

В другій модифікації систему було доповнено магнітним соплом, яке утворюється полем аксіально намагніченого феритового кільця (діаметром 13,5 см, товщиною 1,8 см), що охоплює розрядну камеру поблизу вихідного отвору. В цьому випадку при зниженні тиску до 0,3 мТорр плазма, що витікає з джерела, має меншу, у порівнянні з попереднім випадком, густину, а на її фоні спостерігається потік іонів, прискорених до 120–150 еВ. Такий тип джерела може бути використаний для розробки безітткових космічних двигунів малої тяги.

При дослідженні роботи джерел, зокрема, встановлено наступне:

- 1) В обох варіантах джерела виникає перепад потенціалу між антеною та вихідним отвором, який при зниженні тиску досягає 100–120 В і може бути причиною прискорення іонів в камеру дрейфу. Проте, за відсутності магнітного сопла прискорення іонів не спостерігається. В той же час потік прискорених іонів значно меншої інтенсивності має місце і в індукційному розряді без магнітного поля.
- 2) Встановлено, що при наявності прискорених іонів імпульс плазмового потоку, що витікає з джерела з магнітним соплом, істотно перевищує імпульс потоку в джерелі без сопла, незважаючи на значно менший загальний струм. Виміряна сила тиску плазми на площадку 5 см^2 склала 13 мкН, що відповідає тиску пучка іонів аргону зі струмом $\sim 1 \text{ мА}$ та енергією 100 еВ.
- 3) Введення феромагнітного екрану на виході джерела послаблює проникнення магнітного поля в камеру дрейфу, що в варіанті джерела без сопла змінює форму плазмового факелу з конусоподібного на дифузну і розширює радіальний розподіл густини плазми.
- 4) Мінімальна потужність та мінімальний тиск, при яких можливе підтримання розряду, критично залежать від частоти струму в антені (13,56 МГц, 27,12 МГц або 40,68 МГц) та потенціалу іонізації робочого газу (He, Ne, Ar, Kr, Xe).