

ВИСОКОЧАСТОТНІ ПЛАЗМОВІ ДЖЕРЕЛА ІОНІВ ЯДЕРНОГО МІКРОЗОНДА

В. І. Возний¹, В. І. Мірошніченко¹, С. М. Мордик¹, В. Ю. Сторіжко¹,
Б. Сулкію-Клефф², Д. П. Шульга¹

¹ Інститут прикладної фізики (ІПФ) НАН України, Суми

² Інститут ядерної фізики (ІЯФ), Мюнстер, Німеччина

Розроблено, виготовлено та випробувано макет воднево-гелієвого іонного інжектора, який поєднує нове високояскраве високочастотне джерело іонів та мас-сепаратор. Для підвищення яскравості високочастотного джерела застосовано геліконний розряд. Реалізовано режими гелієвого інжектора іонів з яскравістю $\sim 100 \text{ A}/(\text{m}^2 \text{ рад}^2 \text{ eV})$. Проведено роботи по створенню високочастотних джерел іонів з компактними магнітними системами з постійними магнітами. Виготовлено та випробувано два варіанти високочастотного джерела іонів: геліконне та мультикаспове. Розроблені високочастотні джерела іонів порівняно з існуючими джерелами іонів, що використовуються як інжектори ядерних мікрозондів, мають високу густину плазми $10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, густину струму пучка $10 - 130 \text{ mA}/\text{cm}^2$ та яскравість при високочастотній потужності $\sim 40 - 300 \text{ Вт}$.

Вступ

Джерело іонів ядерного скануючого мікрозонда (ЯСМЗ) повинне забезпечувати такі основні параметри: високу яскравість однорідного та контрольованого за складом іонів у пучку, з малим розкидом по імпульсу іонного пучка; великий термін служби (не менше 500 год); економічний режим роботи (джерело повинне працювати з мінімально можливою кількістю робочої речовини, мінімальним рівнем потужності, що вводиться в плазму); малі габаритні розміри самого джерела іонів, його систем живлення та газозабезпечення.

За сукупністю параметрів високочастотне джерело іонів є одним з найбільш перспективних для використання в ЯСМЗ. Даний тип джерела іонів має значний термін служби (більш 1000 год), стабільність іонно-оптичних параметрів, високий ступінь іонізації газу, компактність, досить великий іонний струм ($1 - 100 \text{ мкА}$) і високу яскравість ($B_n \sim 1 - 100 \text{ Ам}^{-2} \text{ рад}^{-2} \text{ eV}^{-1}$).

Головним напрямком удосконалення ядерного мікрозонда є підвищення яскравості джерела іонів. Яскравість джерела іонів можна розрахувати за формулою [1]

$$B_n = \frac{I}{(\pi \varepsilon_n)^2}, \tag{1}$$

де $I = \pi R^2 j_+$ - емісійний струм іонів, $j_+ = 0,4 qn + (2kT_e/m_i)^{1/2}$ - густина емісійного струму; m_i - маса іона; k - постійна Больцмана; R - радіус емісійної плазмової поверхні іонного джерела; ε_n - нормалізований емітанс пучка іонів. Таким чином, високояскраві плазмові іонні джерела повинні мати плазму з високою іонною густиною n і високою електронною температурою T_e . Висока яскравість пучка може бути отримана при екстракції пучка з високою густиною струму й малим емітансом. Одним з найбільш перспективних напрямів підвищення яскравості високочастотні джерела за рахунок підвищення густини плазми є передача високочастотної енергії генератора високочастотного джерела електронам плазми в геліконному діапазоні частот хвиль. Розвинута теорія та проведені до теперішнього часу експерименти по створенню геліконних джерел плазми [2 - 6] підтверджують можливість ефективного введення потужності в плазму з використанням даного механізму поглинання. В ІПФ НАН України проведено роботи по створенню високочастотних джерел іонів з компактними магнітними системами з постійними магнітами, що працюють у геліконному діапазоні частот.

Одним із перспективних напрямів зменшення енергетичного розкиду пучка іонів є застосування в плазмових джерелах іонів мультикаспової конфігурації магнітного поля [7 - 9]. З цією метою в мультикаспових джерелах іонів використовуються внутрішні антени, металеві розрядні камери та магнітні фільтри. Нині в ІПФ НАН України (м. Суми) у співробітництві з ІЯФ (м. Мюнстер) проведено роботи по створенню високочастотного джерела іонів з мультикасповою конфігурацією магнітних полів. Дана конфігурація магнітного поля використовується у високочастотному джерелі з метою зниження рівня втрат та перезарядки іонів в області витягуючого електрода й розрядної камери високочастотного джерела.

Випробування високочастотних джерел іонів гелію в режимі індукційного розряду

За допомогою експериментальної установки [10] проведено випробування компактного мультикаспового високочастотного джерела іонів з внутрішньою антеною (рис. 1), а також модифікованого джерела іонів із зовнішньою антеною та системою постійних магнітів з аксіально-симетричною конфігурацією магнітного поля. Реалізація магнітних систем з мультикасповою та аксіально-симетричною конфігурацією магнітних полів здійснена постійними магнітами NdFeB з високою індукцією ($> 0,2$ Тл).

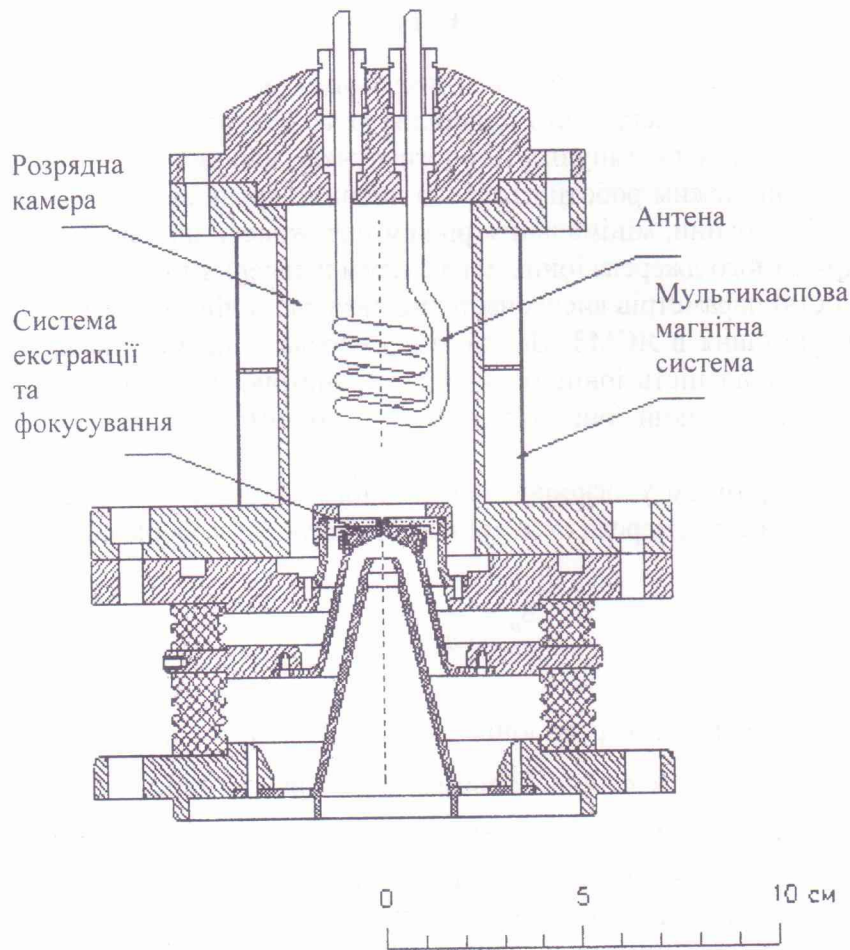


Рис. 1. Схема мультикаспового джерела іонів.

У мультикасповому варіанті джерела з внутрішньою антеною та металевою розрядною камерою реалізовано режими зі струмом іонів гелію 100 мкА при величині введеної потужності в плазму 200 Вт.

Проведено випробування іонно-оптичної системи джерела в режимі реалізації плазмового генератора із зовнішньою антеною. У цьому режимі металеву камеру було

замінено колбою зі скла "Duran". Система витягування має довжину каналу катода 3 мм, а його діаметр 0,6 мм. Розрядна колба має зовнішній діаметр 30 мм і довжину 260 мм. Довжина колби збільшена для можливості реалізації геліконного розряду в сильному зовнішньому магнітному полі. Робочі гази - аргон, гелій, водень. У джерелі використовувалася гвинтова антена з чотирьох витків (мідний провід діаметром 4 мм).

На рис. 2 представлено залежності густини струму іонів гелію від витягуючої напруги при різних рівнях введеної в плазму височастотної потужності для індукційного режиму роботи джерела іонів із зовнішньою антеною без магнітного поля.

При накладенні зовнішнього поздовжнього магнітного поля (~ 80 Гс по довжині антени) реалізовано режими роботи джерела з густиною струму іонів гелію на рівні 130 мА/см² (густина плазми 10¹² см³) при височастотній потужності 300 Вт. Густина плазми оцінювалась за формулою для величини емісійного струму.

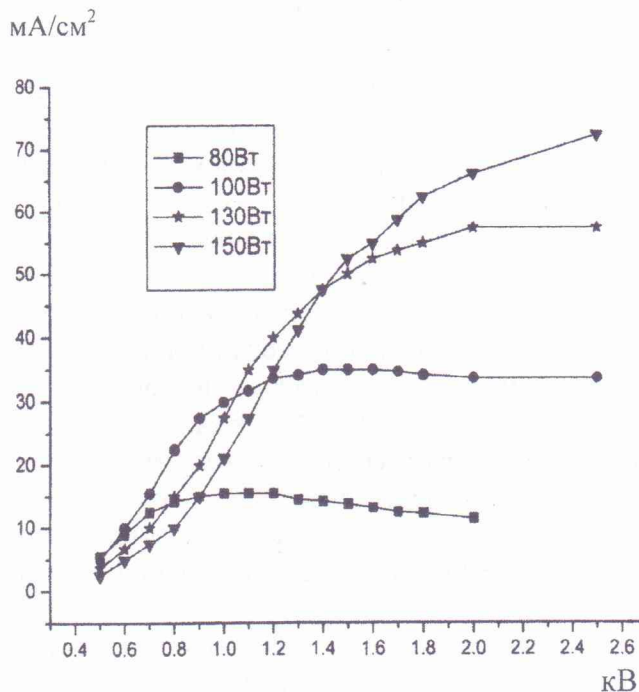


Рис. 2. Залежності густини струму іонів гелію від витягуючої напруги.

Розробка та випробування інжектора іонів. Вибір оптимальних режимів

На рис. 3 представлено схему інжектора для ЯСМЗ з комбінованими функціями мас-енергосепарації та колімації пучка, на базі нового геліконного височастотного джерела іонів з високою яскравістю та фільтра Віна.

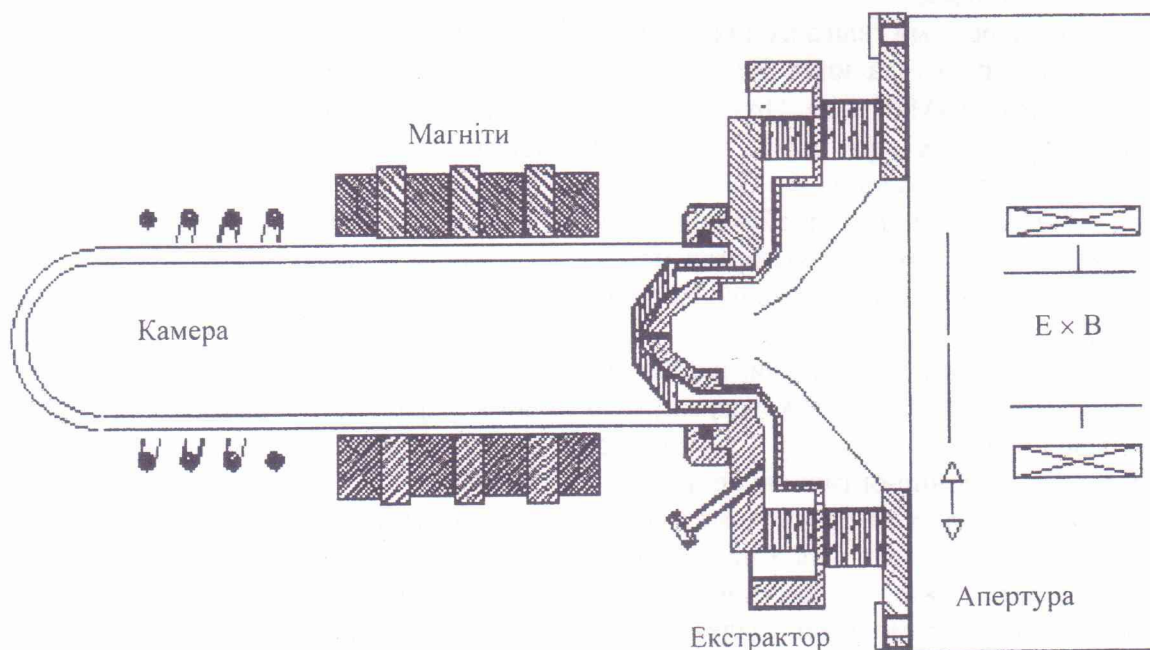


Рис. 3. Схема інжектора іонів.

Високочастотне джерело іонів гелію працює у геліконному частотному діапазоні $\omega_{ci} \ll \omega \ll \omega_{ce}$, де $\omega_{c\alpha} = eB_0/m_{\alpha}c$ - електронна/іонна циклотронна частота. Джерело розроблене для роботи в режимах середніх струмів (1 - 10 мкА) з густиною емісійного іонного струму 1 - 10 мА/см² і малими емітансами пучка (1 - 10 мм · мрад), при цьому потужність, що вводиться в плазму, не перевищує 40 Вт. Виконання системи постійних магнітів у вигляді рівнобіжних кілець, прилеглих один до одного, розташування її між антеною та іонно-оптичною системою з можливістю переміщення вздовж осі по поверхні газорозрядної камери дає змогу створити по довжині антени регульоване магнітне поле, що разом з високочастотним полем, створюваним індуктором, забезпечує в плазмі резонансні умови для збудження й ефективного поглинання хвиль геліконного діапазону частот. При забезпеченні резонансних умов максимум енерговкладу переміщується в центр розрядної камери, що сприяє більш ефективній іонізації та підвищенню густини плазми. В області системи постійних магнітів забезпечується утримання й перенесення плазми в область іонно-оптичної системи. В області емісійного отвору іонно-оптичної системи відбувається стиснення отриманої плазми і, як наслідок, підвищення густини струму пучка. Вихідна апертура джерела призначена для формування емітансу з максимальною інтегральною фазовою густиною.

Конструкція магнітної системи (МС) визначалася із забезпеченням таких умов: 1) величина та структура магнітного поля повинна сприяти ефективному поглинанню високочастотної потужності в плазмі; 2) компактність; 3) забезпечення мінімального збільшення емісійного нормалізованого емітансу; 4) забезпечення оптимальної умови фокусування пучка в системі екстракції та попереднього прискорення джерела іонів.

Розроблено й виготовлено компактну магнітну систему з постійними магнітами кільцевої форми, що дає змогу створювати по довжині високочастотної антени поздовжнє магнітне поле $B_z \sim 25 - 40$ Гс, а також поздовжнє магнітне поле ~ 1000 Гс з ефективною довжиною поля не менше 10 см для утримання й переносу плазми в область системи екстракції.

У високочастотному джерелі іонів гелію іонного інжектора (див. рис. 3) реалізовано високочастотний розряд із зовнішнім магнітним полем із густиною плазми 10^{11} см⁻³ при 40 Вт ($f_{вч} = 27,12$ МГц) високочастотної потужності, що вводиться в плазму. Густина іонного струму всередині витягуючого електрода джерела становила ~ 10 мА/см² при діаметрі емісійного отвору 0,6 мм.

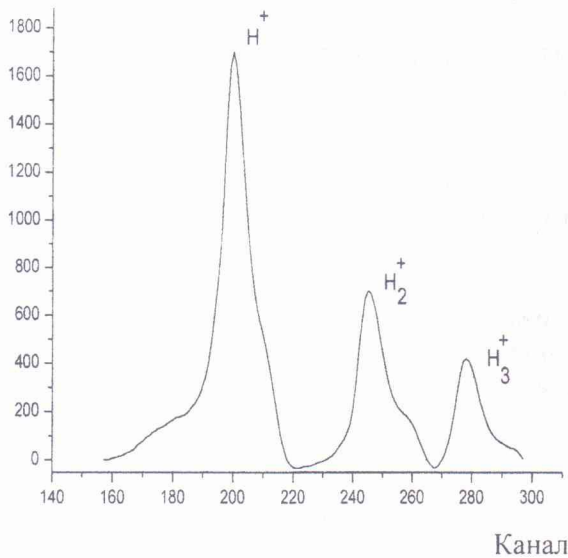
Реалізовано режими гелієвого інжектора іонів з яскравістю ~ 100 А/(м²рад²еВ).

Мас-сепарацію пучка іонів He⁺ було проведено з малою величиною розподілу по масам фільтра Віна ($\Delta M/M = 4$). При цих умовах у класичному фільтрі Віна здійснюється мінімальна деформація фазових "портретів" іонних пучків, що витягуються з високочастотного джерела іонів.

Проведено попередні випробування інжектора іонів у режимі генерації протонного пучка. На рис. 4 представлено розгортку масового складу водневого пучка (67 % H⁺) для одного із стабільних режимів високочастотного джерела іонів із системою постійних магнітів (див. рис. 3).

На відміну від джерел плазми, що використовуються в плазмових технологіях, іонні плазмові джерела (особливо високояскраві) практично не працюють у режимах з робочим тиском більше 10 мТорр. У зв'язку з тим, що існує перепад тисків між розрядною камерою ($p \sim 1 - 10$ мТорр) та іонно-оптичною системою інжектора ($p \sim 10^{-6}$ Торр), у високочастотних джерелах іонів необхідно використовувати режими з мінімальним напуском і максимальною іонізацією газу для забезпечення мінімального росту нормалізованого емітансу в системі екстракції джерела іонів за рахунок перезарядки та зіткнень іонів з нейтральними частинками. На рис. 5 представлено залежність повного (без застосування вихідної апертури) струму пучка водню від величини введеної в плазму високочастотної потужності для одного із стабільних режимів роботи джерела іонів. Як видно з рисунка, дане високочастотне джерело

I, д.о.



I, мкА

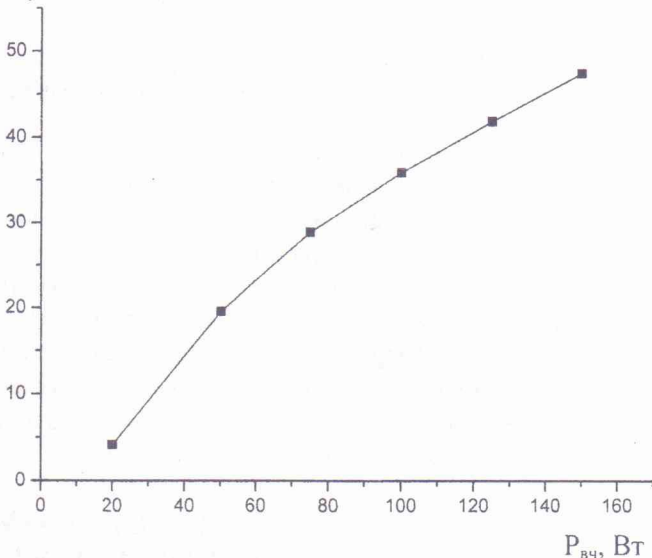


Рис. 4. Масовий склад водневого пучка.

Рис. 5. Залежність струму пучка водню від величини введеної в плазму височастотної потужності (витягуюча напруга 1,5 кВ, прискорююча напруга 15 кВ).

іонів забезпечує струм (> 1 мкА), необхідний для стабільної роботи електростатичного прискорювача ядерного мікрозонда, при введений потужності > 20 Вт. Найближчим часом автори планують провести оптимізаційні дослідження по вибору високояскравих режимів роботи даного височастотного джерела в режимі протонного пучка.

Висновки

Виготовлено та випробувано макет спеціалізованого інжектора для ядерного мікрозонда з комбінованими функціями мас-, енергосепарації та колімації пучка на базі нового височастотного джерела іонів з високою яскравістю (~ 100 А/(м²рад²еВ)). Підвищення яскравості досягається за рахунок використання височастотного розряду в геліконному діапазоні частот та оптимізації системи формування пучка. При накладенні поздовжнього магнітного поля максимум енерговкладу переміщується в центральну осьову частину розрядної камери [6], що сприяє більш ефективній іонізації та підвищенню густини плазми в області екстракції іонів. Це дало змогу одержати досить високу густину іонного струму гелію 130 мА/см² (густину плазми 10¹² см⁻³) при височастотній потужності 300 Вт. Для порівняння в мультикасповому джерелі із внутрішньою антеною та джерелі іонів із зовнішньою антеною без магнітного поля при тій же іонно-оптичній системі формування пучка при височастотній потужності 300 Вт отримано густину іонного струму гелію не більше ніж 80 мА/см².

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Van Steenbergen A. // IEEE Trans. Nucl. Sci. - 1965. - P. 745.
2. Boswell.R.W., Porteous R.K. //Appl. Phys. Lett. - 1987. - Vol. 50. - P. 1130.
3. Chen F.F., Sudit I.D., Light M. // Plasma Sources Sci. Technol. - 1996. - Vol. 5. - P. 173.
4. Shamrai K. P., Taranov V. B. // Plasma Phys. Control. Fusion. - 1994. - Vol. 36. - P. 1717.
5. Akhiezer A. I., Mikhalenko V. S., Stepanov K. N. // Phys. Lett. - 1998. - Vol. A 245. - P. 117.
6. Miroshnichenko V.I., Mordyk S.M., Olshansky V.V. et al. // Nucl. Instr. and Meth. - 2003. - Vol. B 201. - P. 630.
7. Lee Y., Leung K.N. et al. // Nucl. Instr. and Meth. - 1996. - Vol. A 374. - P. 1.
8. Leung K.N., Walther S.R, Hunkel W.B. // Phys. Rev. Lett. - 1985. - Vol. 62. - P. 764.
9. Вересов О.Л., Григоренко С.В., Удовиченко С.Ю. // ЖТФ. - 2000. - Т. 70, вып. 2. - С. 95.
10. Возный В.И., Мирошніченко В.И., Мордик С.Н. и др. // 36. наук. праць Ін-ту ядерних дослід. - 2003. - № 1 (9). - С. 75.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПЛАЗМОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНОВ ЯДЕРНОГО МИКРОЗОНДА

**В. И. Возный, В. И. Мирошниченко, С. М. Мордик, В. Е. Сторижко,
Б. Сулкио-Клефф, Д. П. Шульга**

Разработан, изготовлен и испытан макет водородно-гелиевого ионного инжектора, который объединяет новый высокояркостный высокочастотный источник ионов и масс-сепаратор. Для повышения яркости высокочастотного источника применен геликоновый разряд. Реализованы режимы гелиевого инжектора ионов с яркостью $\sim 100 \text{ A}/(\text{m}^2\text{rad}^2\text{eV})$. Проведены работы по созданию высокочастотных источников ионов с компактными магнитными системами с постоянными магнитами. Изготовлены и испытаны два варианта высокочастотного источника ионов: геликоновое и мультикасповое. Разработанные высокочастотные источники ионов в сравнении с существующими источниками ионов, которые используются в качестве инжекторов ядерных микрозондов, имеют высокую плотность плазмы $10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, плотность тока пучка $10 - 130 \text{ mA}/\text{cm}^2$ и яркость при высокочастотной мощности $\sim 40 - 300 \text{ Вт}$.

RADIOFREQUENCY PLASMA ION SOURCES FOR NUCLEAR MICROPROBE FACILITIES

**V. I. Voznyy, V. I. Miroshnichenko, S. M. Mordyk, V. E. Storizhko,
B. Sulkio-Cleff, D. P. Shulha**

The hydrogen-helium ion injector comprising newly designed radiofrequency ion source with higher brightness ($\sim 100 \text{ A}/(\text{m}^2\text{rad}^2\text{eV})$) and a Wien filter has been designed for use in nuclear microprobe facilities. The helicon discharge was employed for increasing of the radiofrequency source brightness. The radiofrequency ion sources (helicon and multicusp) with compact magnetic systems of permanent magnets have been designed. These ion sources have been operated with current densities of $10 - 130 \text{ mA}/\text{cm}^2$, plasma densities of $10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ and radiofrequency power input into the plasma of $40 - 300 \text{ W}$.

Надійшла до редакції 30.01.04,
після доопрацювання – 09.04.04.