



МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **118959** (13) **C2**  
(51) МПК  
**G21B 1/15** (2006.01)

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

<p>(21) Номер заявки: <b>а 2015 03114</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>04.09.2013</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: <b>10.04.2019</b></p> <p>(31) Номер попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: <b>2012137795, 61/775,444</b></p> <p>(32) Дата подання попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: <b>04.09.2012, 08.03.2013</b></p> <p>(33) Код держави-учасниці Паризької конвенції, до якої подано попередню заявку: <b>RU, US</b></p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: <b>10.08.2015, Бюл.№ 15</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.04.2019, Бюл.№ 7</b></p> <p>(86) Номер та дата подання міжнародної заявки, поданої відповідно до Договору РСТ: <b>PCT/US2013/058093, 04.09.2013</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Бєльченко Юрій І. (RU), Бурдаков Олександр В. (RU), Давиденко Владімір І. (RU), Дімов Геннадій І. (RU), Іванов Олександр А. (RU), Кобец Валерій В. (RU), Смірнов Артьом Н. (US), Біндербауер Міхль В. (US), Севієр Дональд Л. (US), Річардсон Терренс Е. (US)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>ТАЄ Текнолоджіс, Інк., 10631 Pauling, Foothill Ranch, California 92610, United States of America (US)</b></p> <p>(74) Представник: <b>Мошинська Ніна Миколаївна, реєстр. №115</b></p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: Ikeda, Katsunori, et al. "Recent progress of neutral beam injector and beam emission diagnosis in LHD." Plasma Science and Technology Vol. 11, No. 4, 01.08.2009, p. 452-455. Simonin, A., et al. "Mirror-like plasma confinement for a uniform large negative ion source." Nuclear Fusion Vol. 52, No. 6, 17.04.2012, p. 1-7 Beaumont, B., A. Simonin, and E. Giguet. "Design and R&amp;D for the Heating Systems." Proceedings of ITER - The International Seminar, 22-24 January 2007, p. 72 Han, B. X., et al. "Low-energy beam transport studies supporting the spallation neutron source 1-MW beam operation." Review of Scientific Instruments Vol. 83, No. 2 01.02.2012 pp. 02B727-1-02B727-4 Keller, R. "Ion-source and low-energy beam-transport issues for H-accelerators.", Particle Accelerator Conference, 27.03.1999-02.04.1999, pp. 87-91 Takeiri, Yasuhiko. "Negative ion source development for fusion application." Review of Scientific Instruments Vol. 81 No. 2, 26.02.2010, pp. 02B114-1-02B114-7 Marcuzzi, Diego, et al. "Detailed design of the RF source for the 1 MV neutral beam test facility." Fusion Engineering and Design Vol. 84 No. 7-11 01.06.2009, pp. 1253-1258. Tsumori, K., et al. "Stability of High Power Beam Injection in Negative-Ion-Based LHD-NBI." AIP Conference Proceedings. Vol. 1390. No. 1. 26.09.2011, pp. 517-525</p>
---	--

## (54) ІНЖЕКТОР ПУЧКА НЕЙТРАЛЬНИХ ЧАСТИНОК НА ОСНОВІ НЕГАТИВНИХ ІОНІВ

UA 118959 C2

## (57) Реферат:

Інжектор пучка нейтральних частинок на основі негативних іонів містить джерело негативних іонів, прискорювач і нейтралізатор для того, щоб формувати пучок нейтральних частинок приблизно в 5 МВт з енергією приблизно в 0,50-1,0 МеВ. Іони, сформовані за допомогою джерела іонів, попередньо прискорюються перед інжекцією в прискорювач високої енергії за допомогою електростатичного передприскорювача на основі багатоапертурної сітки, який використовується для того, щоб витягувати пучок іонів з плазми і прискорювати до деякої частки необхідної енергії пучка. Пучок з джерела іонів проходить через пару відхиляючих магнітів, які надають можливість пучку зміщуватися по осі перед надходженням в прискорювач високої енергії. Після прискорення до повної енергії пучок надходить в нейтралізатор, в якому він частково перетворюється в пучок нейтральних частинок. Види іонів, які залишилися, розділяються за допомогою магніту і направляються в перетворювачі електростатичної енергії. Пучок нейтральних частинок проходить через запірний клапан і надходить в плазмову камеру.

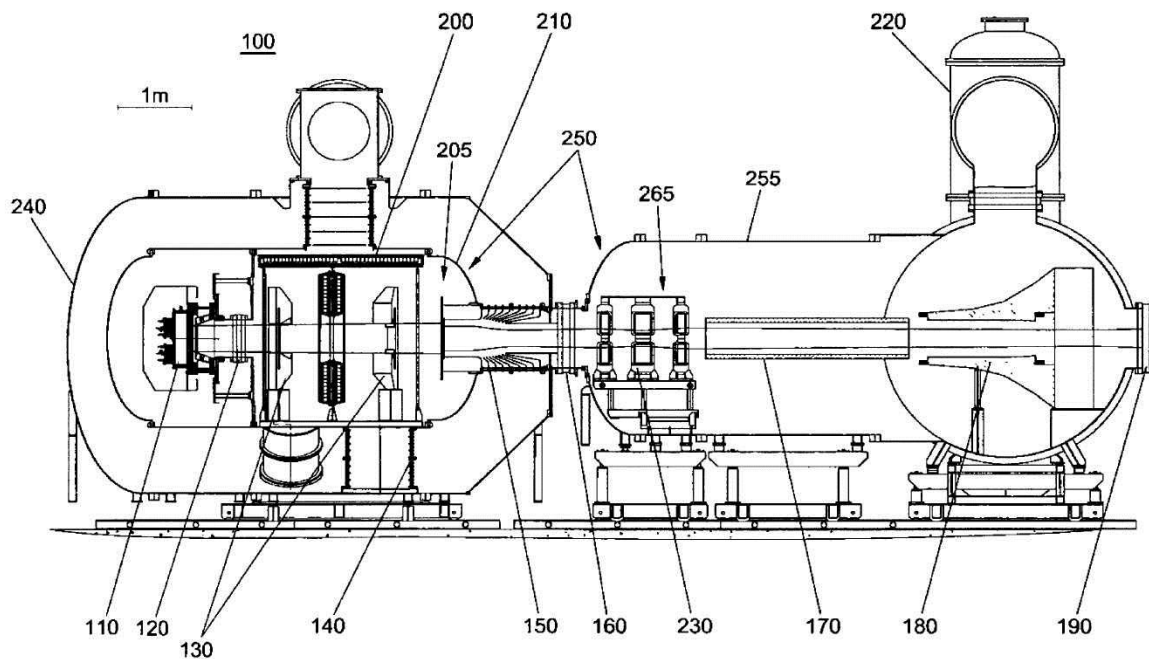


Fig. 1

## Галузь техніки

Предмет винаходу, описаний в даному документі, загалом, стосується інжекторів пучка нейтральних частинок, а конкретніше, інжектора пучка нейтральних частинок на основі негативних іонів.

## 5 Попередній рівень техніки

Фактично до сьогоднішнього дня пучки нейтральних частинок, які використовуються при дослідженнях в галузі термоядерного синтезу, обробки матеріалів, труєнні, стерилізації і в інших варіантах застосування, утворюються з позитивних іонів. Позитивні іони ізотопу водню витягуються і прискорюються з газорозрядної плазми за допомогою електростатичних полів. Відразу після заземленої площини прискорювача вони надходять в газовий елемент, в якому вони піддаються обом реакціям перезарядження для одержання реакцій на основі іонізації електронами і ударної іонізації для додаткової заборони. Оскільки переріз перезарядження падає набагато швидше із збільшенням енергії, ніж переріз іонізації, частка рівноважних нейтральних частинок в товстому газовому елементі починає швидко падати при енергіях, що перевищують 60 кеВ, для частинок водню. Для варіантів застосування пучка нейтральних частинок на основі іонів ізотопу водню, які потребують енергій значно вище цієї, необхідно формувати і прискорювати негативні іони і потім перетворювати їх в нейтральні частинки в тонкому газовому елементі, що може приводити до частки нейтральних частинок приблизно у 60 % в широкому діапазоні енергій аж до декількох МеВ. Навіть ще вищі частки нейтральних частинок можуть бути одержані, якщо плазмовий або фотонний елемент використовується для того, щоб перетворювати пучок негативних іонів високої енергії в нейтральні частинки. У випадку фотонного елемента, в якому енергія фотона перевищує електронну спорідненість водню, частки нейтральних частинок можуть становити майже 100 %. Необхідно зазначити, що в перший раз ідея застосування негативних іонів в фізиці прискорювачів сформульована Alvarez більше 50 років тому [1].

Оскільки пучок нейтральних частинок для збудження і нагрівання струмом у великих термоядерних пристроях майбутнього, а також деякі варіанти застосування в сучасних пристроях вимагають енергій, що істотно перевищують рамки, доступні при використанні позитивних іонів, в останні роки розробляються пучки нейтральних частинок на основі негативних іонів. Проте, струми пучка, які досягаються до даного моменту, значно менші струмів пучка, що формуються повністю звичайним способом за допомогою джерел позитивних іонів. Фізичною причиною меншої продуктивності джерел негативних іонів відносно струму пучка є низька електронна спорідненість водню, яка становить тільки 0,75 еВ. Отже, набагато важче формувати негативні іони водню, ніж їх позитивні еквіваленти. Для новонароджених негативних іонів також досить важко досягати області витягування без зіткнень з електронами великої енергії, які, з дуже високою імовірністю, приводять до втрат надмірного слабкозв'язаного електрона. Витягування іонів  $H^-$  з плазми для того, щоб утворювати пучок, аналогічно є складнішим, ніж для іонів  $H^+$  оскільки негативні іони супроводжуються набагато більшим струмом електронів, якщо тільки не застосовуються заходи зі стримування. Оскільки переріз для зіштовшувального обдирання електрона з іона  $H^-$  для того, щоб формувати атом, значно перевищує переріз для іонів  $H^+$  для того, щоб одержувати електрон з молекули водню, частка іонів, перетворених в нейтральні частинки під час прискорення, може бути значною, якщо густину газопроводу в дорозі прискорювача не мінімізується за допомогою роботи джерела іонів при низькому тиску. Іони, передчасно нейтралізовані під час прискорення, утворюють залишок низької енергії і, загалом, мають більшу дивергенцію, ніж іони, які піддають потенціалу повного прискорення.

Нейтралізація пучка прискорених негативних іонів може виконуватися в газовій мішені з ефективністю приблизно в 60 %. Використання плазмових і фотонних мішеней надає можливість додаткового підвищення ефективності нейтралізації негативних іонів. Загальна ефективність використання енергії інжектора може бути підвищена за допомогою рекуперації енергії видів іонів, що залишаються в пучку після проходження нейтралізатора.

Принципова схема інжектора пучка нейтральних частинок з високим рівнем потужності для ITER-токамаку, який також є типовим для інших систем магнітного утримання плазми, що розглядаються в реакторі, показана на фіг. 3[2]. Базовими компонентами інжектора є сильнострумове джерело негативних іонів, прискорювач іонів, нейтралізатор і магнітний роздільник зарядженого компонента перезарядженого пучка з приймачами/рекуператорами іонів.

Щоб підтримувати необхідні вакуумні умови в інжекторі, типово використовується система високовакуумного відкачування з великими запірними клапанами, які відсікають потік пучка від плазмового пристрою і/або, які надають доступ до головних елементів інжектора. Параметри

пучка вимірюються за допомогою використання висувних калориметричних мішеней, а також за допомогою неруйнуючих оптичних способів. Формування потужних пучків нейтральних частинок вимагає використання відповідного джерела живлення.

Згідно з принципом формування, джерела негативних іонів можуть бути розділені на наступні групи:

- джерела об'ємного формування (плазмові), в яких іони формуються в об'ємі плазми;
- джерела поверхневого формування, в яких іони формуються на поверхні електродів або спеціальних мішеней;
- поверхнево-плазмові джерела, в яких іони формуються на поверхнях електродів, які взаємодіють з плазмовими частинками, які розроблені Новосибірською групою [3]; і
- джерела перезарядження, в яких негативні іони формуються внаслідок перезарядження пучків прискорених позитивних іонів на різних мішенях.

Щоб формувати плазму в сучасних об'ємних джерелах іонів  $H^+$ , аналогічних джерелу позитивних іонів, використовуються дугові розряди з термоелектронними нитками розжарення або порожнистими катодами, а також радіочастотні розряди у водні. Для поліпшення утримання електронів при розряді і для зниження густини водню в газорозрядній камері, що представляє важливість для джерел негативних іонів, використовуються розряди в магнітному полі. Широко використовуються системи із зовнішнім магнітним полем (тобто з геометрією Пенінга або магнетронною геометрією електродів, з коливанням електронів в подовжньому магнітному полі "відбивного" розряду) і системи з периферійним магнітним полем (багатополюсні). Вигляд в перерізі розрядної камери з периферійним магнітним полем, розробленим для струминного інжектора пучка нейтральних частинок JET, показаний на фіг. 4 [3]. Магнітне поле на периферії плазмового боксу формується за допомогою постійних магнітів, встановлених на його зовнішній поверхні. Магніти розміщуються в рядах, в яких напрямок намагнічення є постійним або змінюється в порядку зі зміщенням, так що лінії магнітного поля мають геометрію лінійних або загострених в шаховому порядку виступів біля стінки.

Застосування систем з багатополюсним магнітним полем на периферії плазмових камер, зокрема, дає можливість системам підтримувати густу плазму в джерелі при зниженому робочому тиску газу в камері до 1-4 Па (без цезію) і до 0,3 Па в системах з цезієм [4]. Таке зменшення густини водню в розрядній камері, зокрема, представляє важливість для сильноточових багатоапертурних гігантських джерел іонів, які розробляються для застосувань в ході досліджень в галузі термоядерного синтезу.

У даний час джерела іонів на основі поверхнево-плазмового формування вважаються найбільш придатними для формування сильноточових пучків негативних іонів.

У джерелах іонів на основі поверхнево-плазмового формування іони формуються у взаємодії між частинками, що мають достатню енергію і поверхню з низькою роботою виходу. Цей ефект може підвищуватися за допомогою лужного покриття поверхні, що піддається бомбардуванню. Передбачено два основні процеси, а саме: термодинамічно рівноважна поверхнева іонізація, при якій повільний атом або молекула, що зіштовхується з поверхнею, випускається назад як позитивний або негативний іон після середнього часу перебування, і нерівноважна (кінетична) атомно-поверхнева взаємодія, при якій негативні іони формуються за допомогою розпилення, ударної десорбції (на відміну від термодесорбції, при якій десорбуються теплові частинки), або відбиття при наявності покриття з лужних металів. У процесі термодинамічно рівноважної іонізації адсорбовані частинки відриваються від поверхні за умов теплової рівноваги. Коефіцієнт іонізації частинок, що йдуть з поверхні, визначається за допомогою формули Саха і приблизно становить дуже невеликі  $\sim 0,02\%$ .

Процес нерівноважної кінетичної поверхневої іонізації як передбачають є набагато ефективнішим на поверхні і має досить низьку роботу виходу, порівнянну з електронною спорідненістю негативного іона. У ході цього процесу негативний іон відривається від поверхні, долаючи підповерхневий бар'єр з використанням кінетичної енергії, одержаної з первинної частинки. Біля поверхні енергетичний рівень додаткового електрона нижчий верхнього рівня Фермі електронів в металі, і цей рівень може дуже легко займатися за допомогою тунелювання електронів з металу. Під час іонного переміщення з поверхні він долає потенційний бар'єр,

сформований за допомогою дзеркального заряду  $U_{image} = -\frac{e^2}{4x}$ . Поле картини розподілу зарядів посилює енергетичний рівень додаткового електрона відносно енергетичних рівнів електронів у металі. Починаючи з деякої критичної відстані, рівень додаткового електрона стає вищим верхнього енергетичного рівня електронів в металі, і резонансне тунелювання повертає електрон від відхідного іона назад в метал. У випадку якщо частинка відривається досить швидко, коефіцієнт негативної іонізації приблизно є досить високим для поверхні з низькою

роботою виходу, яка може надаватися за допомогою нанесення покриття з лужного металу, зокрема, цезію.

Експериментально показано, що ступінь негативної іонізації частинок водню, що відриваються від цієї поверхні із зниженою роботою виходу, може досягати

$$\beta^- = \frac{j^-}{j^- + j^0 + j^+} = 0,67$$

Потрібно зазначити, що робота виходу на вольфрамових поверхнях має мінімальне значення з покриттям Cs в 0,6 моношарів (на поверхні вольфрамового кристала 110).

Для розробки джерел негативних іонів водню важливо, щоб інтегральний вихід негативних іонів був досить високим,  $K^-9-25\%$ , для зіткнень атомів водню і позитивних іонів з енергіями 3-25 eV з поверхнями з низькою роботою виходу, таких як Mo+Cs, W+Cs [5]. Зокрема (див. фіг. 5), при бомбардуванні цезованої молібденової поверхні за допомогою атомів Кондону з енергією, що перевищує 2 eV, інтегральна ефективність перетворення в іони  $H^-$  може досягати  $K^-8\%$ .

У поверхнево-плазмових джерелах (SPS) [3] формування негативних іонів реалізовується за рахунок кінетичної поверхневої іонізації, а саме - процесів розпилення, десорбції або відбиття на електродах, що контактують з газорозрядною плазмою. Електроди спеціальних емітерів зі зниженою роботою виходу використовуються в SPS для поліпшення формування негативних іонів. Як правило, додавання невеликої кількості цезію в розряд дає можливість одержувати підвищення яскравості й інтенсивності в колекторі пучків  $H^-$ . Введення атомів цезію в розряд значно знижує супутній потік електронів, що витягаються з негативними іонами.

У SPS газорозрядна плазма виконує декілька функцій, а саме: вона формує інтенсивні потоки частинок, що бомбардують електроди; плазмова оболонка, суміжна з електродом, формує прискорення іонів, тим самим, підвищуючи енергію бомбардуючих частинок; негативні іони, які формуються в електродах з негативним потенціалом, прискорюються за допомогою потенціалу плазмової оболонки і проникають через плазмовий шар в область витягування без істотної деструкції. Інтенсивне формування негативних іонів з досить високою ефективністю використання потужності і газу одержане в різних модифікаціях SPS за умов "брудного" газового розряду і інтенсивного бомбардування електродів.

Декілька джерел SPS розроблені для великих термоядерних пристроїв, таких як LHD, JT-60U і для міжнародного (ITER) токамаку.

Типові ознаки цих джерел можуть розумітися при розгляді інжектора стеларатора LHD [4], який показаний на фіг. 6 [4, 6]. Плазма дугового розряду формується у великій магнітній багатополосній лопатевій захисній камері з об'ємом  $\sim 100$  літрів. Двадцять чотири вольфрамових нитки розжарення підтримують дугу в 3 кА,  $\sim 80$  В при тиску водню приблизно в 0,3-0,4 Па. Зовнішній магнітний фільтр з максимальним полем в центрі  $\sim 50$  Гс надає густину електронів і зниження температури в області витягування біля плазмового електрода. Позитивне зміщення плазмового електрода ( $\sim 10$  В) знижує супутній потік електронів. Негативні іони формуються на плазмовому електроді, покритому за допомогою оптимального шару цезію. Зовнішня цезієва піч (три для одного джерела), забезпечена пневматичними клапанами, подає розподілене введення атомів цезію. Формування негативних іонів досягає максимуму при оптимальній температурі плазмового електрода 200-250 °C. Плазмовий електрод термічно ізолюється, і його температура визначається за допомогою плазмового розряду силових навантажень.

Чотириелектродна багатоапертурна іонно-оптична система, яка використовується в джерелі іонів LHD, показана на фіг. 7 [6]. Негативні іони витягуються через 770 апертур для випромінювання з діаметром по 1,4 см. Апертури займають область  $25 \times 125 \text{ см}^2$  на плазмовому електроді. Невеликі постійні магніти вбудовуються у витягувальну сітку між апертурами, щоб відхиляти електрони, які спільно витягаються з пучка на стінку витягувального електрода. Додаткова електронна затримуюча сітка, встановлена позаду витягувальної сітки, затримує вторинні електрони, зворотно розсіювані або такі, які випускаються зі стінок витягувальних електродів. Багатошлінна заземлена сітка з високою прозорістю використовується в джерелі іонів. Це зменшує область перерізу пучків, тим самим підвищуючи здатність утримування напруги і знижуючи тиск газу в проміжках на коефіцієнт 2,5 з відповідним зменшенням втрат на обдирання пучка. Як витягувальний електрод, так і заземлений електрод мають водяне охолодження.

Введення атомів цезію в багатовістряне джерело надає 5-кратне збільшення струму негативних іонів, що витягаються, і лінійне підвищення виходу іонів  $H^-$  в широкому діапазоні потужностей розряду і тиску при заповненні воднем. Іншими важливими перевагами введення атомів цезію є  $\sim 10$ -кратне зниження електронного струму, яке спільно витягується, і істотне зниження тиску водню при розряді до 0,3 Па.

Багатовістряні джерела в LHD звичайно надають струм іонів приблизно в 30 А з густиною струму  $30 \text{ mA/cm}^2$  в імпульсах тривалістю в 2 секунди [6]. Головними проблемами для джерел іонів LHD є блокування цезію, який вводиться в дугову камеру, за допомогою вольфраму, що розпилюється з ниток розжарення, і зниження здатності утримування високої напруги при роботі в режимі тривалих імпульсів з високим рівнем потужності.

Інжектор пучка нейтральних частинок на основі негативних іонів LHD має два джерела іонів, які взаємодіють з воднем при номінальній енергії пучка в 180 кеВ. Кожний інжектор досягає номінальної потужності інжекції в 5 МВт протягом імпульсу в 128 секунд, так що кожне джерело іонів надає пучок нейтральних частинок в 2,5 МВт. Фіг. 8А і В показують інжектор пучка нейтральних частинок LHD. Фокусна відстань джерела іонів становить 13 м, а точка повороту двох джерел знаходиться на 15,4 м нижче. Порт для інжекції має довжину приблизно 3 м, причому найвужча частина має діаметр 52 см і довжину 68 см.

Джерела іонів з радіочастотними плазмовими формувачами і формування негативних іонів на плазмовому електроді, покритому цезієм, розроблені в IPP Garching. Радіочастотні формувачі формують чистішу плазму, так що в цих джерелах немає блокування цезію за допомогою вольфраму. Витягування в сталому режимі імпульсу пучка негативних іонів зі струмом пучка в 1 А, енергією в ~20 кВ і тривалістю в 3600 секунд продемонстроване IPP в 2011 році.

У даний час інжектори пучка нейтральних частинок високої енергії, які розробляються для термоядерних пристроїв наступного рівня розвитку, таких як, наприклад, ITER-токамак, не демонструють стійку роботу при необхідній енергії в 1 МеВ і роботу в сталому режимі або в режимі незгасальної хвилі (CW) при досить високому струмі. Отже, існує необхідність розробляти практично здійсненні рішення, якщо можна вирішувати проблеми, що заважають досягненню цільових параметрів пучка, таких як, наприклад, енергія пучка в діапазоні 500-1000 кеВ, ефективна густина струму в нейтральних частинках головного порту резервуара в 100-200  $\text{A/m}^2$ , потужність в розрахунку на один інжектор пучка нейтральних частинок приблизно в 5-20 МВт, тривалість імпульсу в 1000 секунд і газові навантаження, що вводяться за допомогою інжектора пучка, менше 1-2 % струму пучка. Потрібно зазначити, що досягнення цієї мети стає набагато менш витратним, якщо струм негативних іонів в модулі інжектора зменшується до витягувального іонного струму до 8-10 А порівняно з витягувальним струмом іонів в 40 А для ITER-пучка. Ступінчасте зниження витягуваного струму і потужності пучка повинно приводити до сильних змін конструкції ключових елементів джерела іонів в формі інжектора і прискорювача високої енергії, так що стають застосовними набагато ретельніше пророблені технології і підходи, що підвищує надійність інжектора. Отже, в ситуації на даний момент пропонується витягуваний струм в 8-10 А з розрахунку на один модуль при допущенні, що необхідна потужність інжекції, що виводиться, може бути одержана з використанням декількох модулів інжектора, що формують пучок з малою розбіжністю і високою густиною струму.

Продуктивність поверхнево-плазмових джерел досить добре задокументована, і декілька джерел іонів, які працюють сьогодні, формують безперервні масштабовані пучки іонів над 1 А або вище. Досі основні параметри інжекторів пучка нейтральних частинок, такі як потужність пучка і тривалість імпульсу, досить далекі від необхідних для інжектора, що розглядається. Поточний стан розробки цих інжекторів можна зрозуміти з таблиці 1.

Таблиця 1

	TAE	ITER	JT-60U	LHD	IPP	CEA-JAERI
Густина струму ( $\text{A/m}^2$ )		200 D <sup>+</sup> 280 H <sup>+</sup>	100 D <sup>+</sup>	350 H <sup>+</sup>	230 D <sup>+</sup> 330 H <sup>+</sup>	216 D <sup>+</sup> 195 H <sup>+</sup>
Енергія пучка (кеВ)	1000 H <sup>+</sup>	1000 D <sup>+</sup> 100 H <sup>+</sup>	365	186	9	25
Тривалість імпульсу (сек)	$\geq 1000$	3600 D <sup>+</sup> 3 H <sup>+</sup>	19	10	<6	5 1000
Відношення кількості електронів до кількості іонів		1	~0,25	<1	<1	<1

Тиск (па)	0,3	0,3	0,26	0,3	0,3	0,35
Коментарі		Комбіновані числа ще не досягнуті, проводяться повномасштабні експерименти в IPP Garching - джерело тривалих імпульсів (MANITU) на сьогодні забезпечує 1 A/20 кВ протягом 3600 сек при D <sup>-</sup>	Джерело у вигляді нитки розжарення	Джере-ло у вигляді нитки розжарення	Радіо-частотне джерело, неповне витягування, випробувальний стенд, відомий як BATMAN, працює при 2 A/20 кВ протягом ~6 сек	Джерело Kamabokoll (JAERI) на MANTIS (CEA)

Отже, бажано надавати поліпшений інжектор пучка нейтральних частинок.

Короткий виклад суті винаходу

- 5 Варіанти здійснення, передбачені в даному документі, направлені на системи і способи для інжектора пучка нейтральних частинок на основі негативних іонів. Інжектор пучка нейтральних частинок на основі негативних іонів містить джерело іонів, прискорювач і нейтралізатор для того, щоб формувати пучок нейтральних частинок приблизно в 5 МВт з енергією приблизно в 0,50-1,0 MeV. Джерело іонів знаходиться у вакуумному баку і формує пучок негативних іонів на
- 10 9 А. Іони, сформовані за допомогою джерела іонів, попередньо прискорюються до 120 keV перед інжекцією в прискорювач високої енергії за допомогою електростатичного передприскорювача на основі багатоапертурної сітки в джерелі іонів, яке використовується для того, щоб витягувати пучок іонів з плазми і прискорювати до деякої частки необхідної енергії пучка. Пучок в 120 keV з джерела іонів проходить через пару відхиляючих магнітів, які надають
- 15 можливість пучку зміщуватися по осі перед надходженням в прискорювач високої енергії. Після прискорення до повної енергії пучок надходить в нейтралізатор, в якому він частково перетворюється в пучок нейтральних частинок. Види іонів, які залишилися, розділяються за допомогою магніту і направляються в перетворювачі електростатичної енергії. Пучок нейтральних частинок проходить через запірний клапан і надходить в плазмову камеру.
- 20 Підтримується підвищена температура плазмових формувачів і внутрішніх стінок плазмового боксу джерела іонів (150-200 °C), щоб запобігати накопиченню цезію на їх поверхнях. Розподільний колектор надається для того, щоб подавати цезій безпосередньо на поверхню плазмових решіток, а не в плазму. Це являє собою відмінність від існуючих джерел іонів, які подають цезій безпосередньо в плазмову розрядну камеру.
- 25 Магнітне поле, що використовується для того, щоб відхиляти спільно витягувані електрони в областях витягування і попереднього прискорення іонів, формується за допомогою зовнішніх магнітів, а не за допомогою магнітів, вбудованих в корпус сітки, як виконано в попередніх конструкціях. Відсутність вбудованих "низькотемпературних" магнітів в сітках надає можливість їх нагрівання до підвищених температур. Попередні конструкції часто використовують магніти,
- 30 вбудовані в корпус сітки, що часто приводить до значного зниження струму витягнутого пучка і перешкоджає роботі в режимі підвищеної температури, а також належній продуктивності нагрівання/охолодження.
- Прискорювач високої напруги не пов'язаний безпосередньо з джерелом іонів, а відділений від джерела іонів за допомогою перехідної зони (лінії транспортування пучка низької енергії -
- 35 LEBT) з відхиляючими магнітами, вакуумними насосами і цезієвими пастками. Перехідна зона перехоплює і видаляє більшість спільно протікаючих частинок, що включають в себе електрони, фотони і нейтральні частинки з пучка, відкачує газ, що виділяється з джерела іонів, і запобігає досягненню ним прискорювача високої напруги, запобігає витіканню цезію з джерела іонів і проникненню в прискорювач високої напруги, запобігає надходженню електронів і нейтральних частинок, які виробляються за допомогою обдирання негативних іонів, в прискорювач високої напруги. У попередніх конструкціях джерело іонів безпосередньо з'єднане з прискорювачем
- 40

високої напруги, що часто приводить до схильності прискорювача високої напруги тому, що газ, заряджені частинки і цезій витікають з джерела іонів і втікають в нього.

Відхиляючі магніти в LEBT відхиляють і фокусують пучок по осі прискорювача і тим самим компенсують всі зміщення і відхилення пучка під час транспортування через магнітне поле джерела іонів. Зміщення між осями передприскорювача і прискорювача високої напруги зменшує надходження спільно протікаючих частинок в прискорювач високої напруги і запобігає зворотному протіканню сильноприскорених частинок (позитивних іонів і нейтральних частинок) в передприскорювач і джерело іонів. Фокусування пучка також сприяє гомогенності пучка, що надходить в прискорювач, порівняно з системами на основі багатоапертурної сітки.

Нейтралізатор включає в себе плазмовий нейтралізатор і нейтралізатор фотонів. Плазмовий нейтралізатор оснований на багатівістряній системі утримання плазми з постійними магнітами сильних магнітних полів на стінках. Фотонний нейтралізатор є фотонною пасткою на основі циліндричного резонатора зі стінками з високим ступенем відбиття і відкачування за допомогою лазерів з високою ефективністю. Ці технології нейтралізаторів ніколи не розглядалися для застосувань в серійних інжекторах пучка нейтральних частинок.

Інші системи, способи, ознаки і переваги зразкових варіантів здійснення повинні ставати очевидними фахівцям в даній галузі техніки після вивчення прикладених креслень і докладного опису.

Короткий опис креслень

Подробиці зразкових варіантів здійснення, що включають в себе структуру і режим роботи, можуть бути виявлені частково за допомогою вивчення прикладених креслень, на яких аналогічні посилання з номерами посилаються на аналогічні частини. Компоненти на кресленнях не обов'язково повинні бути виконані в масштабі, замість цього акцент робиться на ілюстрацію принципів винаходу. Більше того: всі ілюстрації призначені для того, щоб передавати загальні ідеї, при цьому відносні розміри, форми й інші докладні атрибути можуть ілюструватися схематично, а не буквально або точно.

Фіг. 1 є виглядом зверху схеми інжектора пучка нейтральних частинок на основі негативних іонів.

Фіг. 2 є ізометричним виглядом в перерізі інжектора пучка нейтральних частинок на основі негативних іонів, показаних на фіг. 1.

Фіг. 3 є виглядом зверху інжектора з високим рівнем потужності нейтральних частинок для ITER-токамаку.

Фіг. 4 є ізометричним виглядом в перерізі розрядної камери з периферійним багатополюсним магнітним полем для струминного інжектора пучка нейтральних частинок.

Фіг. 5 є діаграмою, що показує інтегральний вихід негативних іонів, що утворюються за допомогою бомбардування поверхні Mo+Cs нейтральними атомами H і позитивним молекулярним H як функція від енергії падаючого потоку. Вихід підвищується за допомогою використання цезування постійним струмом порівняно тільки з попереднім цезуванням поверхні.

Фіг. 6 є виглядом зверху джерела негативних іонів для LHD.

Фіг. 7 є схематичним виглядом багатоапертурної іонної оптичної системи для джерела LHD.

Фіг. 8A і B є виглядами зверху і збоку інжектора пучка нейтральних частинок LHD.

Фіг. 9 є виглядом в перерізі джерела іонів.

Фіг. 10 є виглядом в перерізі джерела атомів водню низької енергії.

Фіг. 11 є графіком, що показує траєкторії іонів H<sup>-</sup> в тракті низької енергії.

Фіг. 12 є ізометричним виглядом прискорювача.

Фіг. 13 є діаграмою, що показує траєкторії іона в прискорюючій трубі.

Фіг. 14 є ізометричним виглядом триплету квадрупольних лінз.

Фіг. 15 є діаграмою, що показує вигляд зверху (a) і вигляд збоку (b) траєкторій іона в прискорювачі лінії транспортування пучка високої енергії.

Фіг. 16 є ізометричним виглядом компонування плазмових мішеней.

Фіг. 17 є діаграмою, що показує результати двовимірних обчислень сповільнення пучка іонів в рекуператорі.

Потрібно зазначити, що елементи аналогічних структур або функцій, загалом, представляються за допомогою аналогічних посилань з номерами для цілей ілюстрації на всіх кресленнях. Також потрібно зазначити, що креслення призначені тільки для того, щоб спрощувати опис переважних варіантів здійснення.

Опис переважних варіантів винаходу

Кожна з додаткових ознак і ідей, розкритих нижче, може бути використана окремо або в поєднанні з іншими ознаками і ідеями, щоб надавати новий інжектор пучка нейтральних



частинок на основі негативних іонів. Далі детальніше описані характерні приклади варіантів здійснення, описаних в даному документі, причому ці приклади використовують багато з цих додаткових ознак і ідей як окремо, так і в комбінації, з посиланням на прикладені креслення. Цей докладний опис призначений тільки для того, щоб навчати фахівців в галузі техніки

додатковим подробицям для використання на практиці переважних аспектів ідей даного винаходу, і не призначений для того, щоб обмежувати об'єм винаходу. Отже, комбінації ознак і етапів, розкритих в подальшому докладному описі, можуть бути необов'язковими для того, щоб використовувати винахід на практиці в самому широкому значенні, а замість цього вивчаються просто для того, щоб конкретно описувати типові приклади даних ідей.

Більше того: різні ознаки типових прикладів і залежні пункти формули винаходу можуть бути комбіновані способами, які не перераховані конкретно і очевидно, щоб надавати додаткові корисні варіанти здійснення даних ідей. Крім цього, потрібно очевидно зазначити, що всі ознаки, розкриті в описі і/або формулі винаходу, мають намір розкриття окремо і незалежно одна від одної для цілей вихідного розкриття суті, а також для цілей обмеження заявленого предмета винаходу, незалежно від компонування ознак у варіантах здійснення і/або в формулі винаходу. Також потрібно зазначити, що всі діапазони значень або вказівники груп об'єктів розкривають кожне можливе проміжне значення або проміжний об'єкт для цілей вихідного розкриття суті, а також для цілей обмеження заявленого предмета винаходу.

Варіанти здійснення, передбачені в даному документі, направлені на новий інжектор пучка нейтральних частинок на основі негативних іонів з енергією переважно приблизно 500-1000 кеВ і високою загальною енергетичною ефективністю. Переважне компонування варіанта здійснення інжектора 100 пучка нейтральних частинок на основі негативних іонів проілюстроване на фіг. 1 і 2. Як проілюстровано, інжектор 100 включає в себе джерело 110 іонів, запірний клапан 120, відхиляючі магніти 130 для відхилення лінії пучка низької енергії, опорний ізолятор 140, прискорювач 150 високої енергії, запірний клапан 160, трубку-нейтралізатор (показана схематично) 170, роздільний магніт (показаний схематично) 180, запірний клапан 190, панелі 200 і 202 для відкачування, вакуумний бак 210 (який є частиною вакуумного резервуара 250, поясненого нижче), кріосорбційні насоси 220 і триплет квадрупольних лінз 230. Інжектор 100, як відмічено вище, містить джерело 110 іонів, прискорювач 150 і нейтралізатор 170 для того, щоб формувати пучок нейтральних частинок приблизно в 5 МВт з енергією приблизно в 0,50-1,0 МеВ. Джерело 110 іонів знаходиться у вакуумному баку 210 і формує пучок негативних іонів на 9 А. Вакуумний бак 210 зміщується до -880 кВ, тобто відносно землі, і встановлений на ізоляційних опорах 140 всередині баку 240 більшого діаметра, заповненого газом SF<sub>6</sub>. Іони, сформовані за допомогою джерела іонів, попередньо прискорюються до 120 кеВ перед інжекцією в прискорювач 150 високої енергії за допомогою електростатичного передприскорювача 111 на основі багатоапертурної сітки (див. фіг. 9) в джерелі 110 іонів, яке використовується для того, щоб витягувати пучок іонів з плазми і прискорювати до деякої частки необхідної енергії пучка. Пучок в 120 кеВ з джерела 110 іонів проходить через пару відхиляючих магнітів 130, які надають можливість пучку зсуватися з осі перед надходженням в прискорювач 150 високої енергії. Панелі 202 для відкачування, показані між відхиляючими магнітами 130, включають в себе перегородку і цезієву пастку.

Допускається, що ефективність використання газу джерела 110 іонів становить приблизно 30 %. Планований струм пучка негативних іонів в 9-10 А відповідає напуску газу 6-7 l·Торр/с в джерелі 110 іонів. Нейтральний газ, який витікає з джерела 110 іонів, підвищує свій середній тиск в передприскорювачі 111 приблизно до  $2 \times 10^{-4}$  Торр. При цьому тиску нейтральний газ приводить до ~10 %-их втрат на обдирання пучка іонів в передприскорювачі 111. Між відхиляючими магнітами 130 передбачені скидання (не показані) для нейтральних частинок, які є наслідком первинного пучка негативних іонів. Також передбачені скидання (не показані) для позитивних іонів, зворотно протікаючих з прискорювача 150 високої енергії. Область 205 лінії транспортування пучка низької енергії з диференціальним відкачуванням з панелей 200 для відкачування використовується відразу після попереднього прискорення, щоб знижувати тиск газу до ~10<sup>-6</sup> Торр до того, як він досягає прискорювача 150 високої енергії. Це вводить додаткові втрати пучка в ~5 %, але оскільки це відбувається при низькій енергії попереднього прискорення, втрати потужності є відносно невеликими. Втрати на перезарядження в прискорювачі 150 високої енергії нижче 1 % при фоновому тиску в 10<sup>-6</sup> Торр.

Після прискорення до повної енергії в 1 МеВ пучок надходить в нейтралізатор 170, в якому він частково перетворюється в пучок нейтральних частинок. Види іонів, які залишилися, розділяються за допомогою магніту 180 і направляються в перетворювачі електростатичної енергії (не показані). Пучок нейтральних частинок проходить через запірний клапан 190 і надходить в плазмову камеру 270.

Вакуумний резервуар 250 розбивається на дві секції. Одна секція містить передприскорювач 111 і лінію 205 пучка низької енергії в першому вакуумному баку 210. Інша секція розміщує лінію 265 пучка високої енергії, нейтралізатор 170 і перетворювачі/рекуператори енергії заряджених частинок у другому вакуумному баку 255. Секції вакуумного резервуара 250 з'єднуються через камеру 260 з трубою-прискорювачем 150 високої енергії всередині.

Перший вакуумний бак 210 є вакуумною межею передприскорювача 111 і лінії 205 пучка низької енергії, і в баку або зовнішньому резервуарі 240 більшого діаметра створюється підвищений тиск  $\text{SF}_6$  для ізоляції високої напруги. Вакуумні баки 210 і 255 виступають як опорна конструкція для внутрішнього обладнання, такого як магніти 130, кріосорбційні насоси 220 і т. д. Відведення тепла з внутрішніх компонентів, які переносять тепло, повинно здійснюватися за допомогою охолоджувальних трубок, які повинні мати розриви ізоляції у випадку першого вакуумного баку 210, який зміщується до -880 кВ.

Джерело іонів

Принципова схема джерела 110 іонів показана на фіг. 9. Джерело іонів включає в себе: електростатичні багатоапертурні попередньо прискорюючі сітки 111, керамічні ізолятори 112, радіочастотні плазмові формувачі 113, постійні магніти 114, плазмовий бокс 115, канали і колектори 116 для охолоджувальної води і газові клапани 117. У джерелі 110 іонів цезована молібденова поверхня плазмових попередньо прискорюючих сіток 111 використовується для того, щоб перетворювати позитивні іони і нейтральні атоми, що утворюються за допомогою плазмових формувачів 113, в негативні іони в об'ємі розширення плазми (об'ємі між формувачами 113 і сітками 111, що указується за допомогою дужки з міткою "PE" на фіг. 9) з утриманням в формі магнітної багатополусної лопаті, як забезпечується за допомогою постійних магнітів 114.

Напруга позитивного зміщення для прийому електронів в плазмових попередньо прискорюючих сітках 111 застосовується до оптимізованих умов для формування негативних іонів. Надання геометричних форм апертурам 111В у плазмових попередньо прискорюючих сітках 111 використовується для того, щоб фокусувати іони  $\text{H}^+$  в апертури 111В витягувальної сітки. Невеликий поперечний магнітний фільтр, сформований за допомогою зовнішніх постійних магнітів 114, використовується для того, щоб знижувати температуру електронів, що розсіюються з області формувача або області PE плазмового емітера плазмового боксу 115 в область ER витягування плазмового боксу 115. Електрони в плазмі відбиваються від області ER витягування за допомогою поля невеликого поперечного магнітного фільтра, сформованого за допомогою зовнішніх постійних магнітів 114. Іони прискорюються до 120 кеВ перед інжекцією в прискорювач 150 високої енергії за допомогою плазмових сіток 111 електростатичного багатоапертурного передприскорювача в джерелі 110 іонів. Перед прискоренням до високої енергії пучок іонів має діаметр приблизно 35 см. Джерело 110 іонів, отже, повинне формувати  $26 \text{ mA/cm}^2$  в апертурах 111В за умови 33 %-ої прозорості в плазмових сітках 111 передприскорювача.

Плазма, яка надходить в плазмовий бокс 115, формується за допомогою решітки плазмових формувачів 113, встановлених на задньому фланці 115А плазмового боксу, яким переважно є циліндрична мідна камера з водяним охолодженням (700 мм в діаметрі на 170 мм в довжину). Відкритий кінець плазмового боксу 115 обмежується за допомогою плазмових сіток 111 передприскорювача системи прискорення і витягування.

Передбачається, що негативні іони повинні формуватися на поверхні плазмових сіток 111, які покриті тонким шаром цезію. Цезій вводиться в плазмовий бокс 115 за допомогою використання системи подачі цезію (не показана на фіг. 9).

Джерело 110 іонів оточене постійними магнітами 114 так, що воно утворює конфігурацію з лінійними вістрями для утримувачів плазми і первинних електронів. Колонки 114А магнітів на циліндричній стінці плазмового боксу 115 з'єднуються в задньому фланці 115А за допомогою рядів магнітів 114В, які також мають лінійно-загострену конфігурацію. Магнітний фільтр біля площини плазмових сіток 111 розділяє плазмовий бокс 115 на плазмовий емітер PE і область ER витягування. Магніти 114С у фільтрі встановлюються у фланці 111А поруч з плазмовими сітками 111, щоб надавати поперечне магнітне поле ( $B=107 \text{ Гс}$  в центрі), яке служить для того, щоб запобігати досягненню області ER витягування за допомогою первинних електронів великої енергії, що виходять з формувачів 113 іонів. Проте, позитивні іони і електрони низької енергії можуть розсіюватися через фільтр в області ER витягування.

Система 111 витягування і попереднього прискорення на основі електродів містить п'ять електродів 111С, 111D, 111Е, 111F і 111G, кожний з яких має 142 отвори або апертури 111В, які утворені ортогонально в них і використовуються для того, щоб надавати пучок негативних іонів. Витягувальні апертури 111В мають діаметр 18 мм, так що загальна площа витягування іонів цих

142 витягувальних апертур становить приблизно  $361 \text{ см}^2$ . Густина негативного іонного струму становить  $25 \text{ мА/см}^2$ , і потрібно формувати пучок іонів на 9 А. Магнітне поле магнітів 114С в фільтрі надходить в проміжки між електростатичними витягувальними і попередньо прискорюючими сітками 111, щоб відхиляти електрони, які спільно витягуються на пази у внутрішній поверхні апертур 111В у витягувальних електродах 111С, 111D і 111Е. Магнітне поле магнітів в магнітному фільтрі 114С разом з магнітним полем додаткових магнітів 114D надає відхилення і перехоплення електронів, що спільно витягуються з негативними іонами. Додаткові магніти 114D включають в себе решітку магнітів, встановлених між тримачами електродів 111F і 111G прискорювача прискорюючої сітки, розташованої нижче від витягувальної сітки, що містить витягувальні електроди 111С, 111D і 111Е. Третій сітчастий електрод 111Е, який прискорює негативні іони до енергії 120 кеВ, позитивно зміщується від заземленого сітчастого електрода 111D, щоб відображати зворотно протікаючі позитивні іони, які надходять в попередньо прискорюючу сітку.

Плазмові формувачі 113 включають в себе дві альтернативи, а саме: радіочастотний плазмовий формувач і атомарний формувач на основі дугового розряду. Розроблений BINP плазмово-дуговий генератор на основі дугового розряду використовується в атомарному формувачеві. Ознака плазмового генератора на основі дугового розряду полягає в утворенні направленного плазмового струменя. Іони в струмені, що розширюється, переміщуються без зіткнень і внаслідок прискорення за допомогою падіння амбіполярного плазмового потенціалу одержують енергії в  $\sim 5\text{-}20 \text{ еВ}$ . Плазмовий струмінь може бути направлений на похилу молібденову або танталову поверхню перетворювача (див. 320 на фіг. 10), на якій в результаті нейтралізації і відбиття струменя формується потік атомів водню. Енергія атомів водню може бути збільшена за рамки початкових  $5\text{-}20 \text{ еВ}$  за допомогою негативного зміщення перетворювача відносно плазмового боксу 115. Експерименти з одержання інтенсивних потоків атомів з таким перетворювачем проведені в Інституті Budker в 1982-1984 роках.

На фіг. 10 розроблене компонування джерела атомів 300 низької енергії показано як таке, що включає в себе газовий клапан 310, катодну вставку 312, електричний вивід в нагрівник 314, колектори 316 охолоджувальної води, електронний емітер 318 LaB6 і іонно-атомний перетворювач 320. В експериментах сформовані потік атомів водню з еквівалентним струмом в  $20\text{-}25 \text{ А}$  і енергія, що варіюється в діапазоні від  $20 \text{ еВ}$  до  $80 \text{ еВ}$ , з ефективністю більше  $50 \%$ .

Таке джерело може бути використане в джерелі негативних іонів, щоб забезпечувати атоми енергією, оптимізованою для ефективного формування негативних іонів на цезованій поверхні плазмових сіток 111.

Лінія транспортування пучка низької енергії

Іони  $\text{H}^-$ , сформовані і попередньо прискорені до енергії 120 кеВ за допомогою джерела 110 іонів при проходженні вздовж лінії 205 транспортування пучка низької енергії, зміщуються перпендикулярно до свого напрямку руху на  $440 \text{ мм}$  з відхиленням за допомогою периферійного магнітного поля джерела 110 іонів і за допомогою магнітного поля двох спеціальних клиноподібних відхиляючих магнітів 130. Це зміщення пучка негативних іонів в лінії 205 транспортування пучка низької енергії (як проілюстровано на фіг. 11) надається для того, щоб розділяти області джерела 110 іонів і прискорювача 150 високої енергії. Це зміщення використовується для того, щоб не допускати проникнення швидких атомів, що з'явилися внаслідок обдирання пучка  $\text{H}^-$ , на залишковому водні в прискорюючій трубці 150, зменшувати потоки цезію і водню з джерела 110 іонів в прискорюючу трубку 150, а також для затримання потоку вторинних іонів з прискорюючої трубки 150 в джерело 110 іонів. На фіг. 11 показані обчислені траєкторії іонів  $\text{H}^-$  в лінії транспортування пучка низької енергії.

Тракт для пучка високої енергії

Пучок низької енергії, що виходить з лінії пучка низької енергії, надходить в традиційний електростатичний багатоапертурний прискорювач 150, показаний на фіг. 12.

Результати обчислення прискорення пучка негативних іонів на 9 А з урахуванням частки просторового заряду показані на фіг. 13. Іони прискорюються від енергії в 120 кеВ до  $1 \text{ МеВ}$ . Прискорюючий потенціал на трубці 150 становить 880 кВ, а крок потенціалу між електродами становить 110 кВ.

Обчислення показують, що напруженість поля не перевищує  $50 \text{ кВ/см}$  в оптимізованій прискорюючій трубці 150 на електродах в зонах можливого протікання електронного розряду.

Після прискорення пучок проходить через триплет 230 промислових традиційних квадрупольних лінз 231, 232 і 233 (фіг. 14), які використовуються для того, щоб компенсувати незначне розфокусування пучка на виході прискорюючої трубки 150 і утворювати пучок з переважним розміром на вихідному порті. Триплет 230 встановлюється у вакуумному баку 255 лінії 265 транспортування пучка високої енергії. Кожна з квадрупольних лінз 231, 232 і 233

включає в себе традиційний набір квадрупольних електромагнітів, які формують звичайні магнітні фокусуючі поля, що забезпечуються у всіх сучасних традиційних прискорювачах частинок.

Обчислені траєкторії пучка негативних іонів на 9 А з поперечною температурою 12 еВ в прискорюючій трубці 150, квадрупольних лінзах 230 і лінії 265 транспортування пучка високої енергії показані на фіг. 15. Обчислення відповідає пучку за межами його фокусуючої точки.

Обчислений діаметр пучка нейтральних частинок з еквівалентним струмом в 6А після нейтралізатора на відстані 12,5 м на напіввисоті радіального профілю становить 140 мм, і 95 % струму пучка знаходяться в колі діаметром в 180 мм.

#### Нейтралізація

Нейтралізатор 170 на основі фотовідщеплення, вибраний для системи пучка, дозволяє досягати більше, ніж 95 %-ого обдирання пучка іонів. Нейтралізатор 170 містить решітку ксенонових ламп і циліндричну світлову пастку зі стінками з високим ступенем відбиття, щоб надавати необхідну густину фотонів. Охолоджуваний дзеркала з коефіцієнтом відбиття, що перевищує 0,99, використовуються для того, щоб забезпечувати потік потужності на стінках приблизно в 70 кВт/см<sup>2</sup>. В альтернативі, замість цього може бути використаний плазмовий нейтралізатор з використанням традиційної технології, але за рахунок незначного зниження ефективності. Однак, ефективність нейтралізації в ~85 % плазмового елемента є повністю достатньою, якщо система відновлення енергії має ефективність >95 %, відповідно до прогнозів.

Плазма в плазмовому нейтралізаторі утримується в циліндричній камері 175 з багатополісним магнітним полем на стінках, яке формується за допомогою решіток постійних магнітів 172. Загальний вигляд утримуючого пристрою показаний на фіг. 16. Нейтралізатор 170 включає в себе колектори 171 охолоджувальної води, постійні магніти 172, катодні зборки 173 і катоди 174 LaB6.

Циліндрична камера 175 має довжину 1,5-2 м і має отвори на кінцях для проходження пучка. Плазма формується за допомогою використання декількох катодних зборок 173, встановлених в центрі утримуючої камери 175. Робочий газ подається біля центра пристрою 170. В експериментах з прототипом такого плазмового нейтралізатора 170 потрібно зазначити, що утримання електронів за допомогою багатополісних магнітних полів 172 на стінках є досить хорошим і значно краще утримання іонів плазми. Щоб вирівнювати втрати іонів і електронів, в плазмі розвивається значний негативний потенціал, так що іони ефективно утримуються за допомогою електричного поля.

Досить тривале утримання плазми приводить до відносно низького рівня потужності розряду, необхідного для того, щоб підтримувати густину плазми приблизно в  $10^{13}$  см<sup>-3</sup> в нейтралізаторі 170.

#### Рекуперація енергії

Існують об'єктивні причини досягнення високої ефективності використання потужності в наших умовах. Передусім, це наступне: відносно невеликий струм пучка іонів і розсіяння при низькій енергії. У схемі, що описується в даному документі, при використанні плазмових або пароподібних металевих мішеней можна чекати, що залишковий струм іонів повинен становити ~3 А після нейтралізатора. Ці потоки відведених іонів з позитивним або з негативним зарядом повинні відхилитися через відхиляючий магніт 180 до двох рекуператорів енергії, по одному для позитивних і негативних іонів, відповідно. Проведені чисельні моделювання сповільнення цих залишкових пучків відведених іонів типово з енергією в 1 MeV і 3А в прямих перетворювачах в рекуператорах без компенсації просторового заряду. Прямий перетворювач перетворює істотну частину енергії, що міститься в залишковому пучку відведених іонів, безпосередньо в електрику і подає іншу частину енергії як високоякісне тепло для включення в тепловий цикл. Прямі перетворювачі відповідають конструкції електростатичного багатоапертурного уповільнювача, внаслідок чого послідовні секції заряджених електродів формують подовжні пробійні поля і поглинають кінетичну енергію іонів.

Фіг. 17 показує результати двовимірних обчислень сповільнення пучка іонів в перетворювачі. З представлених обчислень слідує, що сповільнення пучка іонів з енергією в 1 MeV до енергії в 30 кеВ повністю здійсненне, так що може бути одержане значення коефіцієнта рекуперації в 96-97 %.

Попередні спроби розробки інжекторів пучка нейтральних частинок з високим рівнем потужності на основі негативних іонів проаналізовані, щоб розкривати критичні проблеми, які досі заважають досягненню інжекторів зі стабільною роботою в сталому режимі ~1 MeV і потужністю в декілька МВт. З найважливіших виділимо наступні:

- Керування шаром цезію, а також втратами і повторним осадженням (керування температурою і т. д.)

- Оптимізація поверхневого формування негативних іонів для витягування

- Розділення спільно протікаючих електронів

5 - Негомогенність профілю іонного струму в плазмовій сітці внаслідок внутрішніх магнітних полів

- Низька густина іонного струму

- Прискорювачі ускладнюються, і множина нових технологій як і раніше розробляється (здатність утримання низької напруги, великі ізолятори і т. д.)

10 - Зворотне протікання позитивних іонів

- Вдосконалені технології нейтралізаторів (плазми, фотонів) не демонструються в релевантних умовах

- Перетворення енергії не пророблене в достатній мірі

- Блокування пучка в тракці

15 Інноваційні вирішення проблем, передбачених в даному документі, можуть бути груповані згідно з системою, з якою вони з'єднуються, а саме: джерело негативних іонів, витягування/прискорення, нейтралізатор, енергетичні перетворювачі і т. д.

1.0 Джерело 110 негативних іонів:

20 1.1. Підтримується підвищена температура внутрішніх стінок плазмового боксу 115 і плазмових формувачів 113 (150-200 °C), щоб запобігати накопиченню цезію на їх поверхнях.

Підвищена температура:

- запобігає некерованому вивільненню цезію внаслідок десорбції/розпилення і зниження його проникнення в іонну оптичну систему (сітки 111),

- зменшує абсорбцію і рекомбінацію атомів водню в шарі цезію на стінках,

25 - зменшує споживання і отруєння цезію.

Щоб досягати цього, високотемпературне текуче середовище циркулює через всі компоненти. Температура поверхонь додатково стабілізується через керування з активним зворотним зв'язком, тобто: тепло відводиться або додається в ході роботи в CW-режимі і в перехідних режимах. На відміну від цього підходу, всі інші існуючі і заплановані інжектори пучка використовують пасивні системи з водяним охолодженням і тепловими пробоями між охолоджувальними трубками і корпусами гарячого електрода.

30 1.2. Цезій подається через розподільний колектор безпосередньо на поверхню плазмових сіток 111, а не в плазму. Подача цезію через розподільний колектор:

- забезпечує керовану і розподілену подачу цезію протягом всього часу активації пучка,

35 - запобігає нестачі цезію типово внаслідок блокування за допомогою плазми,

- знижує вивільнення цезію з плазми після його накопичення і розблокування в ході тривалих імпульсів.

На відміну від цього, існуючі джерела іонів подають цезій безпосередньо в розрядну камеру.

2.0 Передприскорювач 111 (100 кеВ):

40 2.1. Магнітне поле, що використовується для того, щоб відхиляти спільно витягувані електрони в областях витягування і попереднього прискорення іонів, формується за допомогою зовнішніх магнітів, а не за допомогою магнітів, вбудованих в корпус сітки, як виконано в попередніх конструкціях:

- лінії магнітного поля в проміжках високої напруги між сітками є повністю увігнутими в напрямку негативно зміщених сіток, тобто в напрямку плазмової сітки у витягуючому проміжку і в напрямку витягуючої сітки в попередньо прискорюючому проміжку. Увігнутість ліній магнітного поля в напрямку негативно зміщених сіток запобігає появі локальних пасток Пенінга в проміжках високої напруги і уловлюванню/розмноженню спільно витягуваних електронів, що може відбуватися в конфігураціях з вбудованими магнітами.

50 - електроди іонної оптичної системи (IOS) (сітки 111) без вбудованих "низькотемпературних" NIB-магнітів можуть бути нагріті до підвищеної температури (150-200 °C) і забезпечують можливість відведення тепла в ході тривалих імпульсів за допомогою використання гарячої (100-150 °C) рідини.

- відсутність вбудованих магнітів залишає вільне місце між апертурами випромінювання сіток і дозволяє введення каналів для ефективнішого нагрівання/охолодження електродів.

55 На відміну від цього, попередні конструкції використовують магніти, вбудовані в тіло сітки. Це приводить до створення статичних магнітоелектричних пасток в проміжках високої напруги, які вловлюють і збільшують спільно витягувані електрони. Це може приводити до значного зниження струму витягуваного пучка. Це також перешкоджає роботі в режимі підвищеної

температури, як і належної продуктивності нагрівання/охолодження, що є критичним для роботи в режимі тривалих імпульсів.

2.2. Завжди підтримується підвищена температура всіх електродів іонної оптичної системи (сітки 111) (150-200 °C), щоб запобігати накопиченню цезію на їх поверхнях і підвищувати інтенсивність високої напруги витягувальних і попередньо прискорюючих проміжків. На відміну від цього, в традиційних конструкціях електроди охолоджуються за допомогою води. Електроди мають підвищені температури, оскільки існують теплові пробої між охолоджувальними трубками і тілами електрода, і відсутній активний зворотний зв'язок.

2.3. Початкове прогрівання сіток 111 при запуску і відведення тепла протягом фази активації пучка виконується за допомогою пропущення гарячої рідини з керованою температурою через внутрішні канали в сітках 111.

2.4. Газ додатково накачується із попередньо прискорюючого проміжку через простір збоку і великі отвори в тримачах сітки, щоб знижувати тиск газу вздовж лінії пучка і затримувати обдирання негативних іонів і формування/розмноження вторинних частинок в проміжках.

2.5. Включення позитивно зміщених сіток 111 використовується для того, щоб відштовхувати зворотно протікаючі позитивні іони.

3.0 Прискорювач 150 високої напруги (1 MeV):

3.1. Прискорювач 150 високої напруги не зв'язаний безпосередньо з джерелом іонів, а відділений від джерела іонів за допомогою перехідної зони (лінії транспортування пучка низької енергії - LEBT 205) з відхиляючими магнітами 130, вакуумними насосами і цезієвими пастками. Перехідна зона:

- перехоплює і видаляє більшість спільно протікаючих частинок, що включають в себе електрони, фотони і нейтральні частинки з пучка,
- відкачує газ, що виділяється з джерела 110 іонів, і запобігає досягненню ним прискорювача 150 високої напруги,
- запобігає витіканню цезію з джерела 110 іонів і проникненню в прискорювач 150 високої напруги,
- запобігає надходженню електронів і нейтральних частинок, що формуються за допомогою обдирання негативних іонів, в прискорювач 150 високої напруги.

У попередніх конструкціях джерело іонів безпосередньо з'єднане з прискорювачем високої напруги. Це приводить до піддавання прискорювача високої напруги тому, що газ, заряджені частинки і цезій витікають з джерела іонів і втікають в нього. Ці сильні перешкоди зменшують здатність утримання напруги прискорювача високої напруги.

3.2. Відхиляючі магніти 130 в LEBT 205 відхиляють і фокусують пучок по осі прискорювача. Відхиляючі магніти 130:

- компенсують всі зміщення і відхилення пучка під час транспортування через магнітне поле джерела 110 іонів,
- зміщення між осями передприскорювача і прискорювача 111 і 150 високої напруги зменшує надходження спільно протікаючих частинок в прискорювач 150 високої напруги і запобігає зворотному протіканню сильноприскорених частинок (позитивних іонів і нейтральних частинок) в передприскорювач 111 і джерело 110 іонів.

На відміну від цього попередні системи не мають фізичного розділення між стадіями прискорення і, як наслідок, не надають можливість осьових зміщень, як показано в даному документі.

3.3. Магніти лінії 205 пучка низької енергії фокусують пучок на вході одноапертурного прискорювача 150:

- Фокусування пучка сприяє гомогенності пучка, що надходить в прискорювач 150, порівняно з системами на основі багатоапертурної сітки.

3.4. Застосування одноапертурного прискорювача:

- спрощує системне поєднання і фокусування пучка
- сприяє відкачуванню газу і видаленню вторинних частинок з прискорювача 150 високої енергії
- зменшує втрати пучка на електродах прискорювача 150 високої енергії.

3.5. Магнітні лінзи 230 використовуються після прискорення, щоб компенсувати перефокусування в прискорювачі 150 і утворювати квазіпаралельний пучок.

У традиційних конструкціях немає засобів для фокусування пучка і відхилення, за винятком самого прискорювача.

4.0. Нейтралізатор 170:

4.1. Плазмовий нейтралізатор на основі багатовістряної системи утримання плазми з постійними магнітами сильних полів на стінках;

- підвищує ефективність нейтралізації,
- мінімізує загальні втрати інжектора пучка нейтральних частинок.

Ці технології ніколи не розглядалися для застосування в серійних інжекторах пучка нейтральних частинок.

5 4.2. Фотонний нейтралізатор - фотонна пастка на основі циліндричного резонатора зі стінками з високим ступенем відбиття і відкачування за допомогою лазерів з високою ефективністю:

- додатково підвищує ефективність нейтралізації,
- додатково мінімізує загальні втрати інжектора пучка нейтральних частинок.

10 Ці технології ніколи не розглядалися для застосування в серійних інжекторах пучка нейтральних частинок.

5.0. Рекуператори:

5.1. Застосування рекуператора(ів) залишкової енергії іонів:

- підвищує загальну ефективність інжектора.

15 На відміну від цього, рекуперація взагалі не передбачається в традиційних конструкціях.

Бібліографічний список

[1.] L. W. Alvarez, Rev. Sci. Instrum. 22, 705 (1951 рік)

[2.] R. Hemsworth et al., Rev. Sc. Instrum., тому 67, стор. 1120 (1996 рік)

[3.] Capitelli M. i Gorse S., IEEE Trans on Plasma Sci, 33, номер 6, стор. 1832-1844 (2005 рік)

20 [4.] Hemsworth R. S., Inoue T., IEEE Trans on Plasma Sci, 33, номер 6, стор. 1799-1813 (2005 рік)

[5.] B. Rasser, J. van Wunnik i J. Los, Surf. Sci. 118 (1982), стор. 697 (1982 рік)

[6.] Y. Okumura, H. Hanada, T. Inoue et al. AIP Conf. Proceedings # 210, Нью-Йорк, стор. 169-183 (1990 рік)

25 [7.] O. Kaneko, Y. Takeiri, K. Tsumori, Y. Oka i M. Osakabe et al., "Engineering prospects of negative-ion-based neutral beam injection system from high power operation for the large helical device", Nucl. Fus., тому 43, стор. 692-699, 2003 рік

Хоча винахід допускає різні модифікації і альтернативні форми, його конкретні приклади показані на кресленнях і детально описані в даному документі. Всі посилання визначено повністю містяться в даному документі. Проте, потрібно розуміти, що винахід не обмежений конкретними розкритими формами або способами, а навпаки, винахід повинен охоплювати всі модифікації, еквіваленти і альтернативи, що потрапляють в межі суті і об'єму прикладеної формули винаходу.

## 35 ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Інжектор пучка на основі негативних іонів, який містить:

- джерело (110) іонів, виконане з можливістю формувати пучок негативних іонів;

- передприскорювач (111), пов'язаний з джерелом іонів;

40 - прискорювач (150), причому прискорювач просторово відділений від джерела іонів за допомогою перехідної зони; і

- пару відхиляючих магнітів (130), розміщених між передприскорювачем і прискорювачем, причому пара відхиляючих магнітів надає можливість пучку з передприскорювача зміщуватися з осі перед надходженням у прискорювач.

45 2. Інжектор за п. 1, в якому джерело іонів включає в себе плазмову камеру і плазмові формувачі, при цьому внутрішні стінки плазмової камери (115) і плазмові формувачі (113) виконані з можливістю функціонувати при підвищених температурах близько 150-200 °C для запобігання накопиченню цезію на їх поверхнях.

3. Інжектор за одним з пп. 1 або 2, в якому передприскорювач містить електростатичну багатопертурну сітку в джерелі іонів.

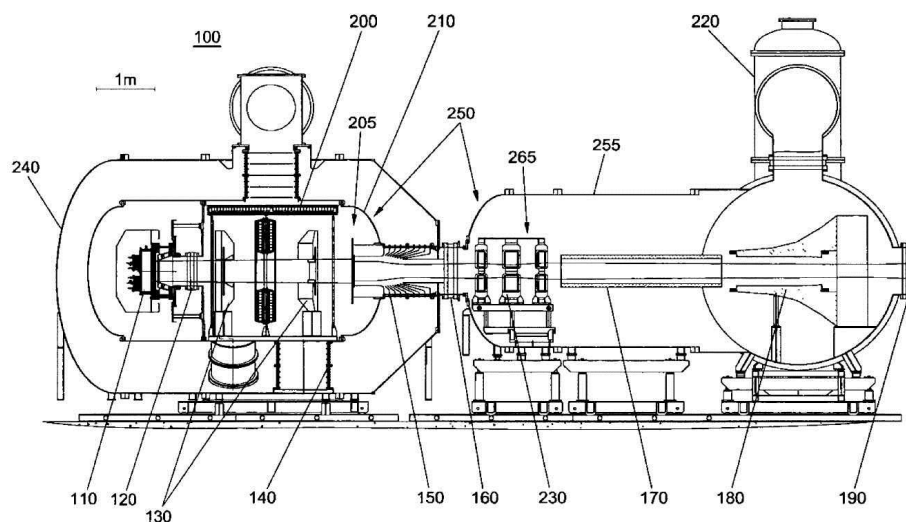
4. Інжектор за п. 2, в якому плазмова камера і формувачі включають в себе колектори і проходи (116) для текучих середовищ для циркуляції високотемпературного текучого середовища.

5. Інжектор за п. 3, який додатково містить розподільний колектор для прямої подачі цезію на плазмові сітки (111) прискорювача.

55 6. Інжектор за п. 3, в якому передприскорювач включає в себе зовнішні магніти (114), щоб відхиляти спільно витягвані електрони в областях витягування і попереднього прискорення іонів.

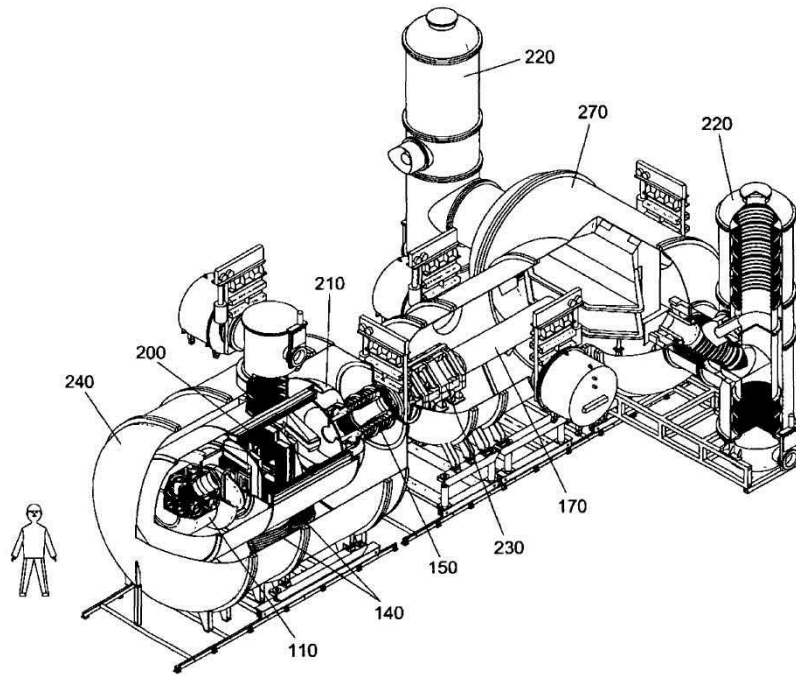
7. Інжектор за п. 3, який додатково містить систему відкачування (190, 200, 202), щоб відкачувати газ з проміжку попереднього прискорення.

8. Інжектор за п. 5, в якому плазмові сітки (111) позитивно зміщені, щоб відштовхувати зворотно протікаючі позитивні іони.
9. Інжектор за будь-яким з пп. 1 або 2, в якому перехідна зона містить лінію (205) транспортування пучка низької енергії, причому перехідна зона містить лінію транспортування пучка низької енергії з відхиляючими магнітами (130), вакуумними насосами і цезієвими пастками, або причому перехідна зона містить лінію транспортування пучка низької енергії з вакуумними насосами, цезієвими пастками і відхиляючими магнітами, які відхиляють і фокусують пучок по осі прискорювача високої енергії.
10. Інжектор за будь-яким з пп. 1, 2, 4-9, який додатково містить магнітні лінзи (230) після прискорювача, щоб компенсувати перефокусування в прискорювачі і утворювати квазіпаралельний пучок.
11. Інжектор за будь-яким з попередніх пунктів, який додатково містить нейтралізатор (170), зв'язаний з прискорювачем.
12. Інжектор за п. 11, в якому нейтралізатор включає в себе плазмовий нейтралізатор, який містить багатівістряну систему (175) утримання плазми з постійними магнітами (172) сильних полів на стінках, фотонний нейтралізатор, який містить циліндричний резонатор зі стінками з високим ступенем відбиття і відкачуванням за допомогою лазерів або фотонний нейтралізатор на основі циліндричного резонатора зі стінками з високим ступенем відбиття і відкачуванням за допомогою лазерів, причому коефіцієнт відбиття стінок вище 0,99.
13. Інжектор за п. 12, який додатково містить рекуператор залишкової енергії іонів.

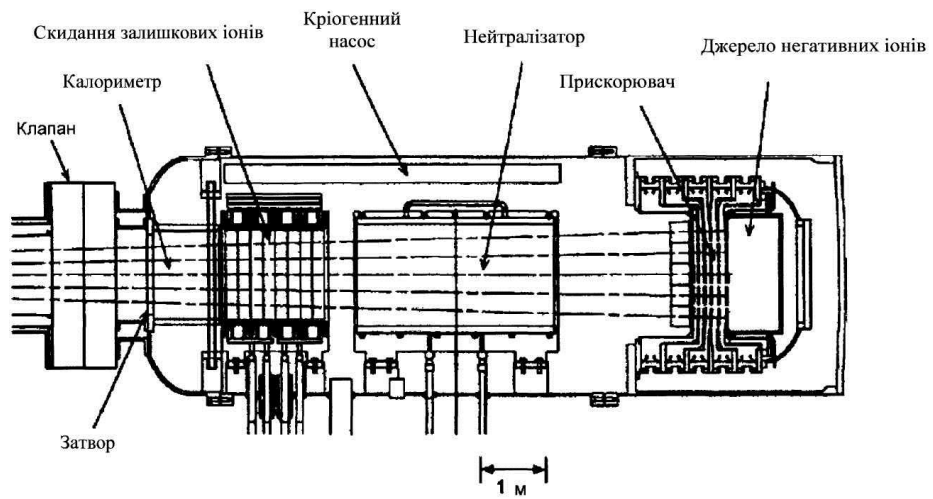


Фіг. 1

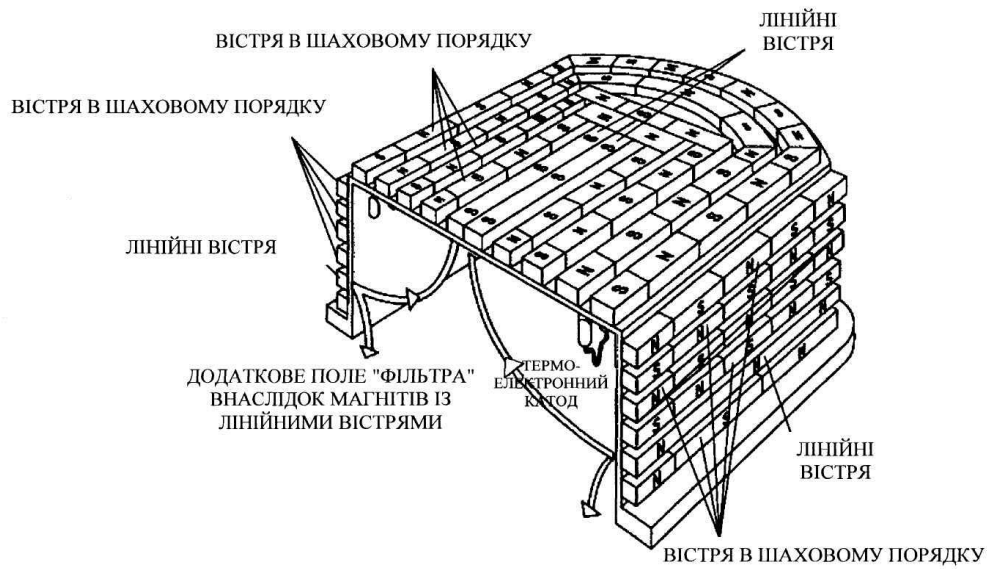




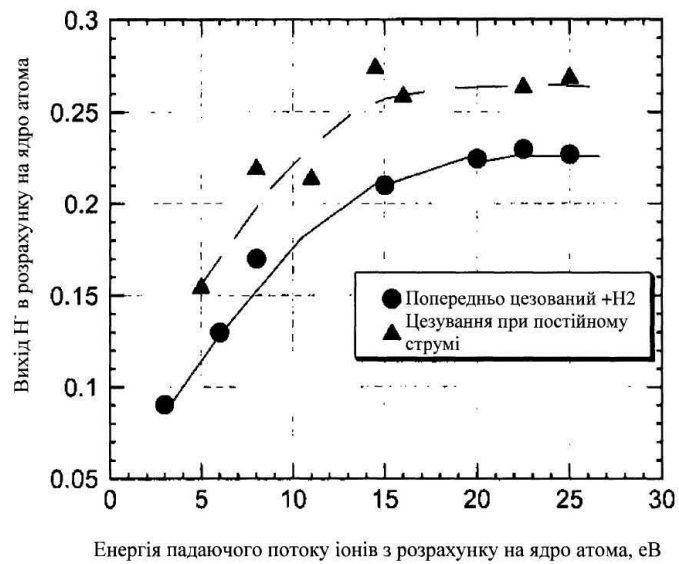
Фиг. 2



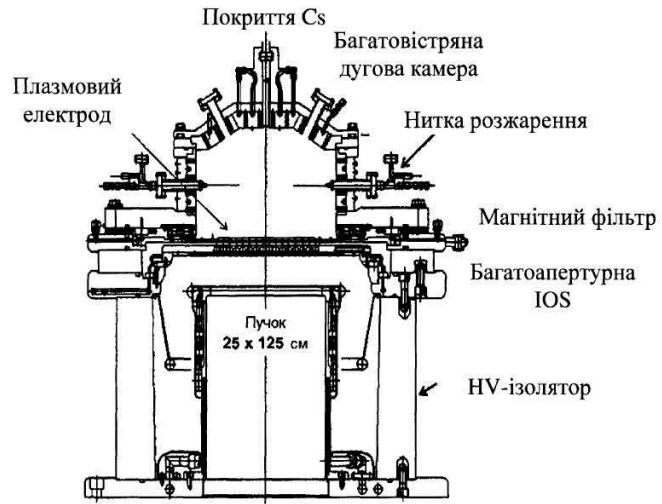
Фиг. 3



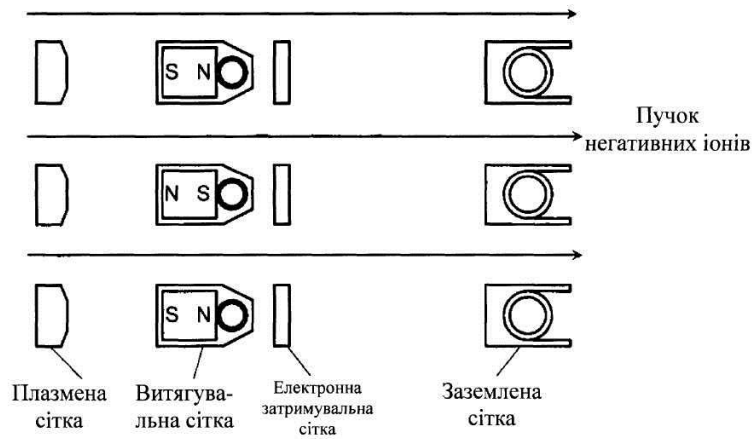
Фіг. 4



Фіг. 5



Фіг. 6



Фіг. 7

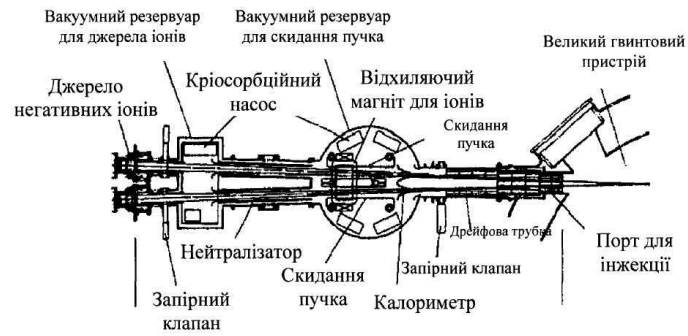
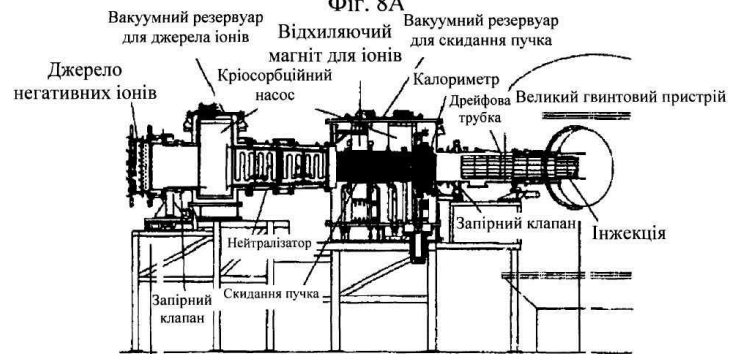


Fig. 8A



Фиг. 8В

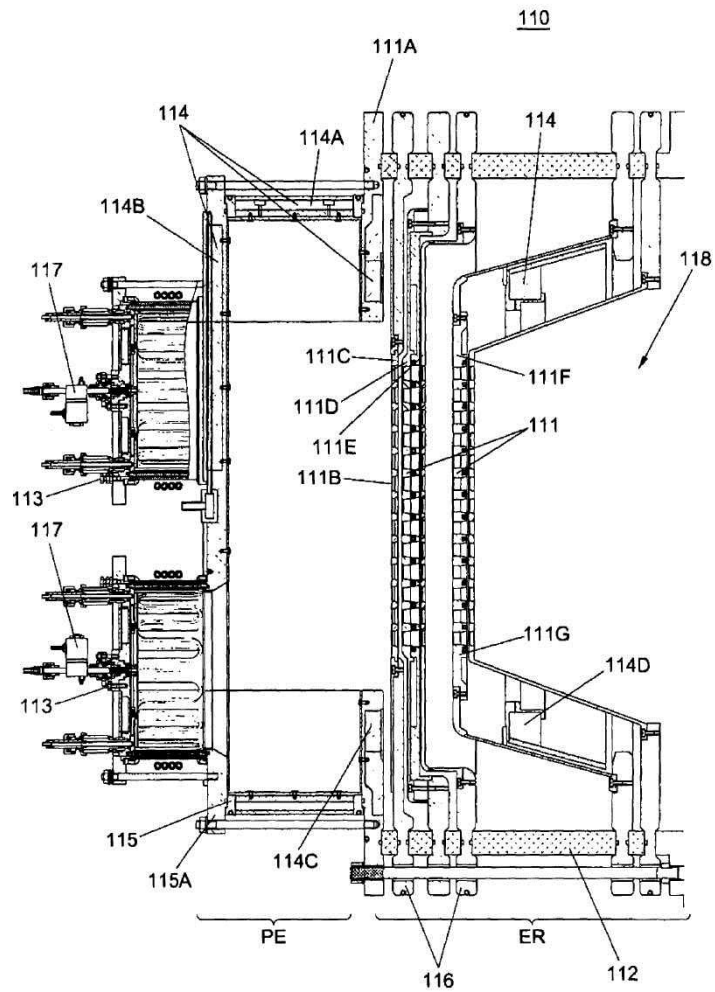


Fig. 9

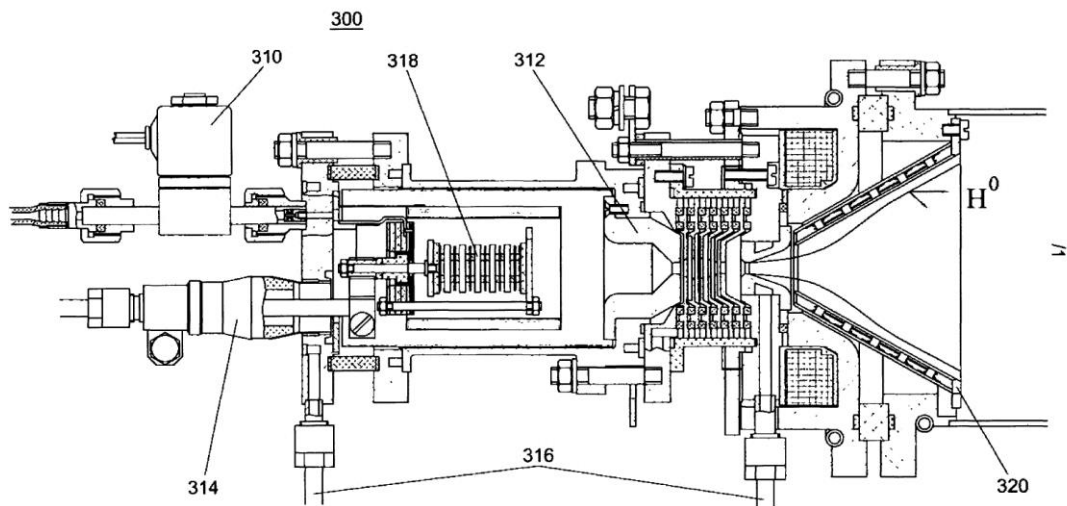


Fig. 10

MAGEL3D\_1.00 06-10-2009 15:59 ion\_beam\_transport\_v16

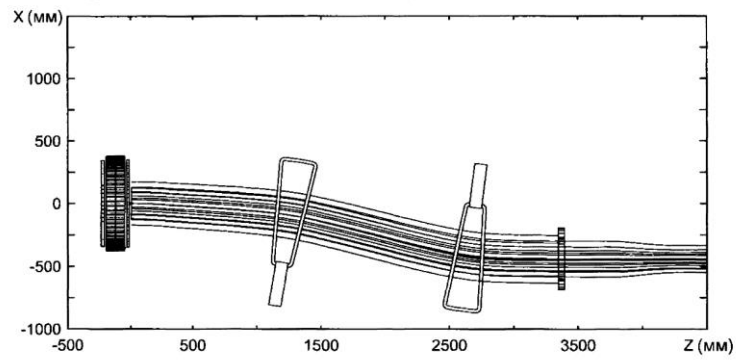


Fig. 11

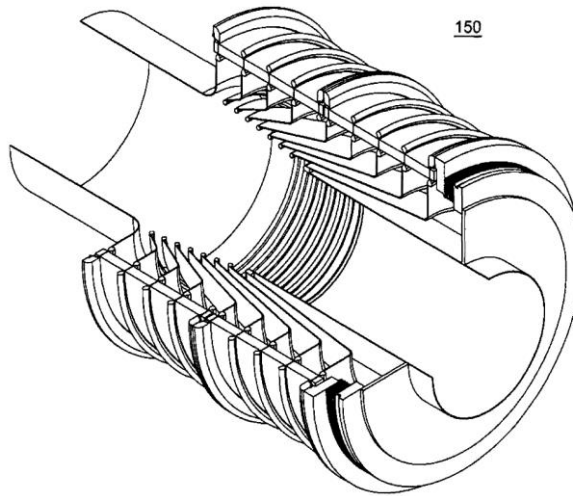


Fig. 12

ESAM\_V1.6 09-07-2009 18:36 ion\_beam\_tube\_1mev\_9a\_v6

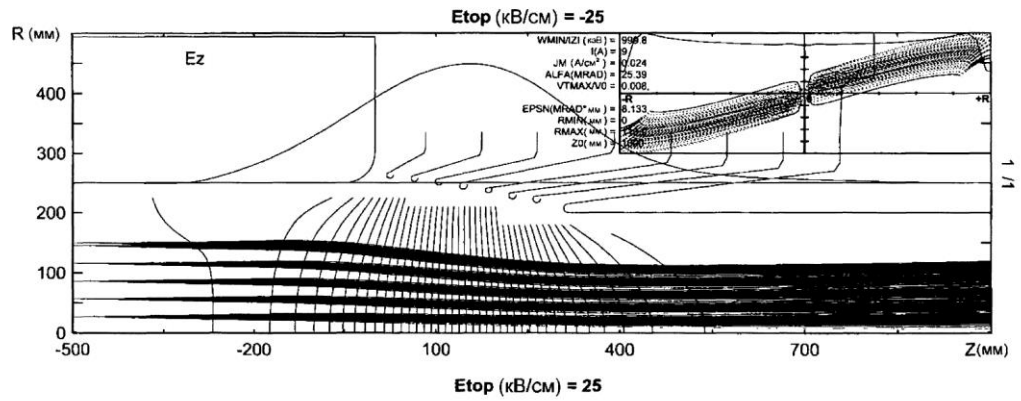
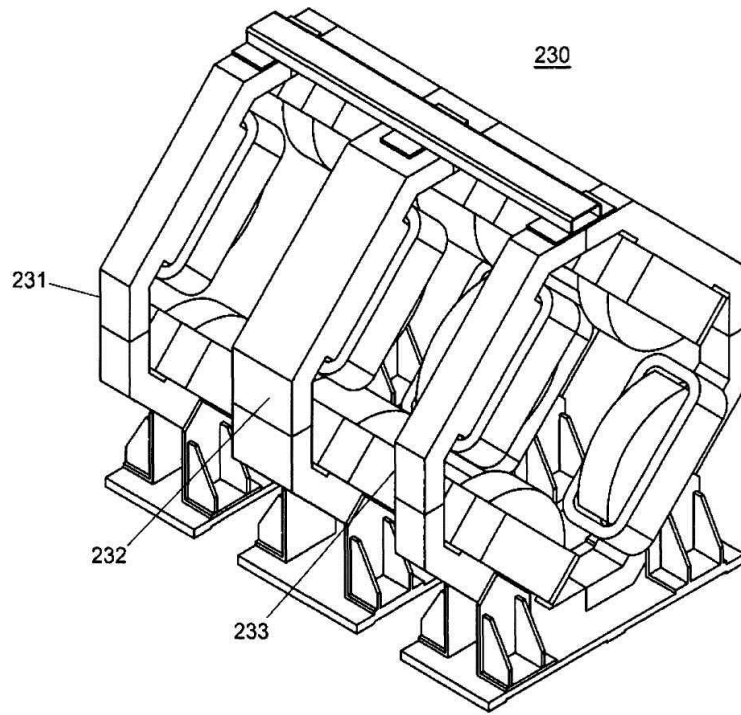
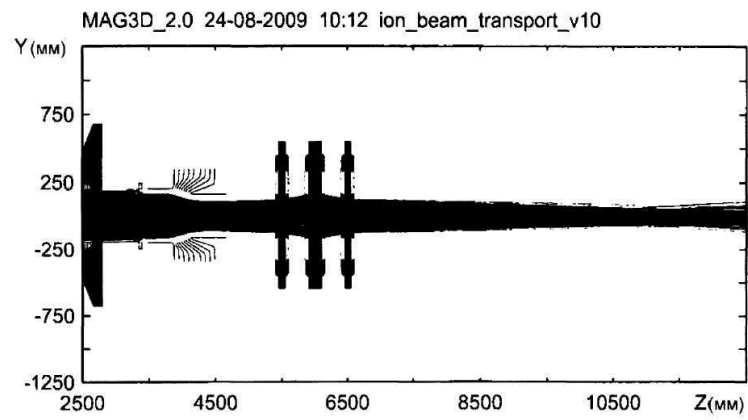
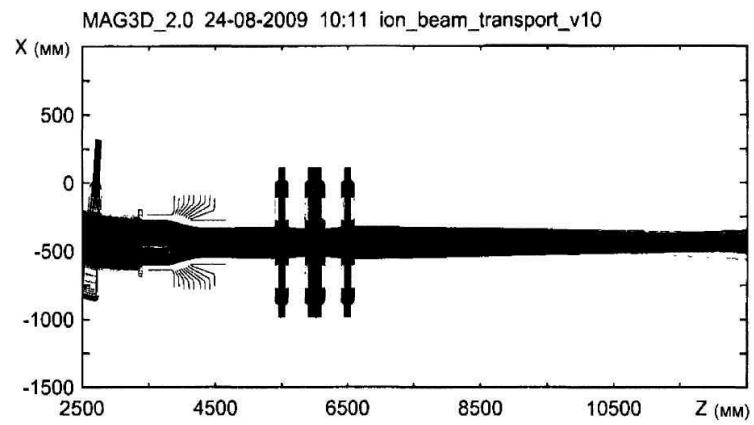


Fig. 13



Фиг. 14



Фиг. 15

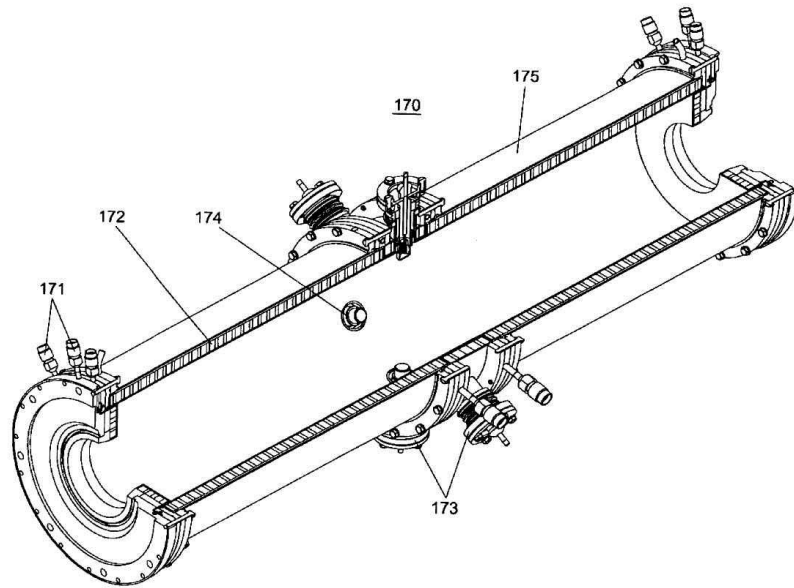


Fig. 16

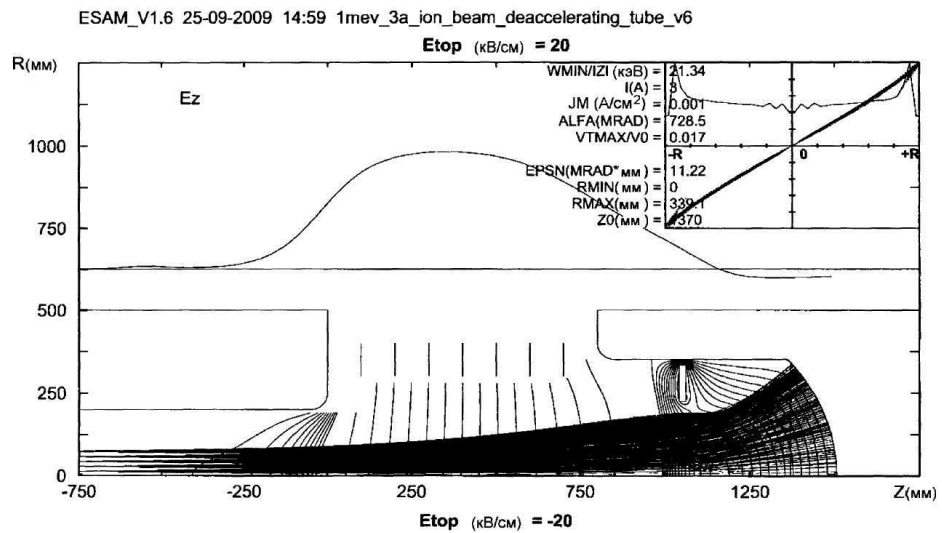


Fig. 17

Комп'ютерна верстка В. Мацело

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601