



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 130842

(13) C2

(51) МПК

G21B 1/05 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки:	а 2022 04649	(72) Винахідник(и):	Сдерберг Ян (SE)
(22) Дата подання заявки:	11.11.2021	(73) Володілець (володільці):	НОВАТРОН ФЬЮЖН ГРУП АБ, Storvretsvägen 154, 163 47 Spånga, Sweden (SE)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності:	28.05.2026	(74) Представник:	Крилова Надія Іванівна, реєстр. №30
(31) Номер попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції:	PCT/EP2020/081762	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:	US 4252608 A, 24.02.1981 FURTH ET AL: "The energy source: Nuclear fusion reactors", APPLIED ENERGY, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS, vol. 47, no. 2-3, January 1994, pages 147-167 WO 2021/094372 A1 (20.05.2021)
(32) Дата подання попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції:	11.11.2020		
(33) Код держави-учасниці Паризької конвенції, до якої подано попередню заявку:	EP		
(41) Публікація відомостей про заявку:	01.11.2023, Бюл.№ 44		
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію:	27.05.2026, Бюл.№ 21		
(86) Номер та дата подання міжнародної заявки, поданої відповідно до Договору РСТ	PCT/EP2021/081409, 11.11.2021		

(54) ОБЛАДНАННЯ З МАГНІТНИМ ВІДДЗЕРКАЛЕННЯМ

(57) Реферат:

Обладнання з магнітним віддзеркаленням (2100; 2200; 3100; 3200) для утримання плазми, яке має множину поздовжньо розташованих надпровідних котушок (2104, 2105, 2106a, 2106b), призначених для створення області (2106) утримання плазми відкритого поля, і ця область (2106) утримання плазми на кожному з двох кінців обмежена відповідною зоною (2108) віддзеркалення підвищеної щільності магнітного потоку відносно центральної зони (2110) області (2106) утримання плазми, причому надпровідна котушка (2105, 2106a, 2106b) множини надпровідних котушок розташована поруч із зоною (2108) віддзеркалення, і має поперечний переріз, у площині, що перетинає лінію (2112) магнітного поля крізь зону віддзеркалення, який має витягнуту форму в напрямку вздовж лінії (2112) магнітного поля.

UA 130842 C2

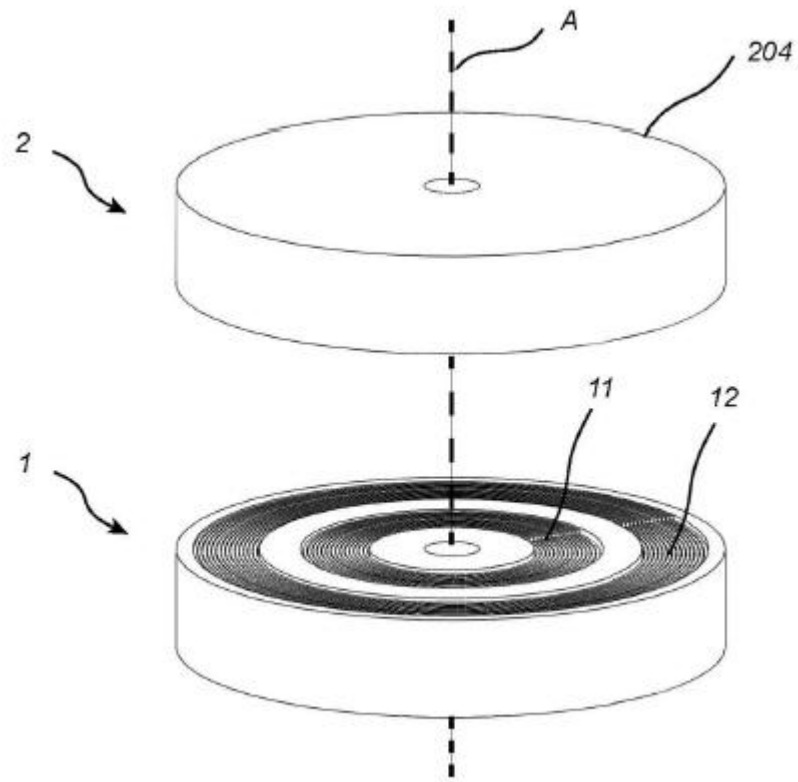


Fig. 1a

Галузь техніки

Винахід стосується обладнання з магнітним віддзеркаленням для утримання плазми.

Рівень техніки

Багато зусиль докладається для розробки реактора для керованого термоядерного синтезу на землі. Найбільш багатообіцяючим є процес термоядерного синтезу водородних ізотопів дейтерію (^2H) і тритію (^3H). У процесі термоядерного синтезу дейтерію і тритію утворюється альфа-частинка ^4He , яка має кінетичну енергію приблизно 3,5 MeV, і нейтрон, який має кінетичну енергію приблизно 14,1 MeV.

Щоб відбувся термоядерний синтез, ядро атома повинно бути у формі плазми з температурою близько 150 мільйонів кельвінів. Забезпечення утримання такої плазми залишається серйозною проблемою.

Утримання плазми включає утримання заряджених частинок плазми. Відомо кілька різних магнітних конфігурацій для утримання плазми. Добре відомою конструкцією є магнітне віддзеркалення. У ньому частинки слідує за лініями магнітного поля, зазвичай проходячи по суті подовжньо крізь обладнання з магнітним віддзеркаленням, і відбиваються в зонах збільшення щільності магнітного потоку на відповідних кінцях пристрою. Іншими словами, зона утримання плазми обладнання з магнітним віддзеркаленням на кожному з двох кінців обмежена відповідною зоною віддзеркалення зі збільшеною щільністю магнітного потоку відносно центральної зони області утримання плазми.

Надпровідні котушки добре відомі тим, що здатні пропускати великі електричні струми, тобто, завдяки закону Ампера, здатні генерувати велику щільність магнітного потоку. Фактори, що обмежують при проектуванні та застосуванні надпровідної котушки стосовно максимально досяжної щільності магнітного потоку, що створюється котушкою, включають, по-перше, максимальну щільність електричного струму, можливу в надпровідному матеріалі до порушення його надпровідних властивостей, і, по-друге, максимальну щільність магнітного потоку, можливу в самому надпровідному матеріалі перед порушенням його надпровідних властивостей.

Таким чином, існує потреба максимізувати характеристики обладнання з магнітним віддзеркаленням, враховуючи наведені вище конструктивні обмеження.

Суть винаходу

Метою цього винаходу є вирішення або принаймні пом'якшення вищевказаної проблеми.

Для цього, згідно з першим аспектом, пропонується обладнання з магнітним віддзеркаленням для утримання плазми, що має множину подовжньо розміщених надпровідних котушок, розташованих для створення області утримання плазми відкритого поля, причому, область утримання плазми на кожному з двох кінці, які обмежені відповідною зоною віддзеркалення підвищеної щільності магнітного потоку відносно центральної зони області утримання плазми, причому, надпровідна котушка з множини надпровідних котушок розташована поруч із зоною віддзеркалення, і надпровідна котушка має переріз в площині, що перетинає лінію магнітного поля крізь зону віддзеркалення, має витягнуту форму в напрямку вздовж лінії магнітного поля.

Поперечний переріз, що має подовжену форму, слід розуміти як такий, що має простягання, в першому основному напрямку поперечного перерізу, що становить принаймні вдвічі, більш переважно втричі, ще більш переважно в чотири рази і ще більш переважно в п'ять разів простягання в другому основному напрямку поперечного перерізу. Подовжену форму слід розуміти як таку, що охоплює, але не обмежується цим, прямокутний, еліптичний, форми півмісяця та/або трубчасто-сегментної форми поперечний переріз. Перший і другий головні напрямки можуть бути ортогональні один одному, але другий напрямок також може бути криволінійним, тобто мати вигнуту форму відносно першого напрямку, як у випадку з поперечним перерізом у формі труби.

Під напрямком уздовж силової лінії магнітного поля слід розуміти напрямок, більш паралельний магнітній силовій лінії, ніж перпендикулярний магнітній силовій лінії. Зокрема, напрямок уздовж лінії магнітного поля може бути паралельним або по суті паралельним лінії магнітного поля.

Дана концепція винаходу впливає з усвідомлення того, що розташування надпровідної котушки з подовженим поперечним перерізом у напрямку вздовж лінії магнітного поля в зоні віддзеркалення може дозволити максимізувати максимальну щільність магнітного потоку в зонах віддзеркалення обладнанням з магнітним віддзеркаленням, враховуючи проектні обмеження максимально допустимої щільності магнітного потоку всередині надпровідної котушки та максимальної щільності струму котушки.

У свою чергу, висока щільність магнітного потоку в зонах віддзеркалення може забезпечити високе коефіцієнт дзеркальності у обладнанні з магнітним віддзеркаленням, тобто високе

співвідношення між максимальною щільністю магнітного потоку в зоні віддзеркалення та щільністю магнітного потоку в центральній зоні обладнання з магнітними віддзеркаленням, що таким чином може зменшити розмір конуса втрат і забезпечити краще утримання плазми.

Висока щільність магнітного потоку в зонах віддзеркалення може забезпечити високий сумарний магнітний потік в обладнанні з магнітним віддзеркаленням.

Таким чином, за допомогою даної концепції винаходу пропонуються обладнання з магнітним віддзеркаленням, що має надпровідні котушки, що максимізують щільність магнітного потоку в зонах віддзеркалення, враховуючи конструктивні обмеження надпровідних котушок.

Альтернативно або додатково, висока щільність магнітного потоку в зонах віддзеркалення може дозволити високий добуток щільності магнітного потоку в радіусі в центральній зоні обладнання з магнітним віддзеркаленням.

Сегмент периметра згаданої площі поперечного перерізу, направлений до зони віддзеркалення, може бути опуклим, якщо дивитися ззовні сегмента периметра. Альтернативно або додатково, сегмент периметра може бути вигнутий у тому ж напрямку, що й лінія магнітного поля в зоні віддзеркалення. Це може дозволити ще більше збільшити максимальну щільність магнітного потоку в зонах віддзеркалення.

Сегмент периметра площі поперечного перерізу, направлений від зони віддзеркалення, може бути увігнутим, якщо дивитися ззовні сегмента периметра. Альтернативно або додатково, сегмент периметра може бути вигнутий у тому ж напрямку, що й лінія магнітного поля в зоні віддзеркалення. Це може дозволити ще більше збільшити максимальну щільність магнітного потоку в зонах віддзеркалення.

Сегмент периметра площі поперечного перерізу, направлений до зони віддзеркалення, може проходити паралельно сегменту периметра площі поперечного перерізу, направленому від зони віддзеркалення. Це може дозволити ще більше збільшити максимальну щільність магнітного потоку в зонах віддзеркалення.

Множину надпровідних котушок можна розташувати коаксіально і поздовжньо з проміжком, і кожна з них виконана з можливістю пропускання відповідних струмів в одному напрямку. Це особливо вигідне застосування концепції цього винаходу.

Множина надпровідних котушок може мати першу магнітну систему, що включає першу множину концентрично розташованих надпровідних круглопетлевих котушок, що містить першу надпровідну котушку, виконану для пропускання струму в першому напрямку; і другу надпровідну котушку, призначену для пропускання струму у другому напрямку, протилежному першому напрямку; і другу магнітну систему, що включає другу множину концентрично розташованих круглопетлевих котушок, розташованих із дзеркальною симетрією щодо першої магнітної системи відносно площини симетрії, розташованої між першою магнітною системою та другою магнітною системою. Це ще одне особливо корисне застосування даної концепції винаходу.

Множина надпровідних котушок може додатково мати третю магнітну систему, розташовану радіально за межами області утримання плазми, причому, третя магнітна система має щонайменше одну надпровідникову круглопетльову котушку.

Згідно з іншим аспектом, забезпечується реактор термоядерного синтезу, що має обладнання з магнітним віддзеркаленням згідно першого аспекту. Цей аспект, як правило, може мати ті ж особливості та переваги, що й перший аспект.

Згідно з іншим аспектом, передбачено застосування обладнання з магнітним віддзеркаленням першого аспекту в термоядерному реакторі. Цей аспект, як правило, може мати ті ж особливості та переваги, що й перший аспект.

Короткий опис креслень

Вищезазначені, а також додаткові об'єкти, ознаки та переваги цього винаходу будуть краще зрозумілі з наступного ілюстративного та необмежувального детального опису переважних варіантів здійснення з посиланням на додані креслення, де будуть використані ті самі номери позицій для подібних елементів, де:

Фіг. 1a є видом в перспективі першої магнітної системи та другої магнітної системи, які можуть входити до складу пристрою утримання плазми.

Фіг. 1b є видом в перспективі з вирізом першої та другої магнітних систем на Фіг. 1a.

Фіг. 1c є видом в плані поперечного перерізу першої та другої магнітних систем на Фіг. 1a і 1b.

Фіг. 2 є видом в плані, що показує змодельовані лінії магнітного поля, створені першою та другою магнітними системами на Фіг. 1a, 1b і 1c.

Фіг. 3a є видом в перспективі з вирізами першої магнітної системи, другої магнітної системи та третьою магнітної системи, які містяться в пристрої утримання плазми.

Фіг. 3b є видом в плані поперечного перерізі першої, другої та третьої магнітних систем на Фіг. 3a.

Фіг. 4a і 4b є видами в плані, що показують змодельовані лінії магнітного поля, створені першою, другою і третьою магнітними системами на Фіг. 3a і 3b.

5 Фіг. 5a і 5b є видами в перспективі з вирізами, що показують пристрої утримання плазми.

Фіг. 6, 7 і 8 представлені види в перспективі з вирізами пристрою утримання плазми.

Фіг. 9 є видом в плані, що показує змодельовані лінії магнітного поля, створені звичайною конфігурацією з прямим магнітним віддзеркаленням.

10 Фіг. 10 є видом в плані, що показує змодельовані лінії магнітного поля, створені першою та другою магнітними системами.

Фіг. 11 є видом в плані, що показує змодельовані лінії магнітного поля, створені першою, другою та третьою магнітними системами.

15 Фіг. 12 є видом в плані, що показує змодельовані лінії магнітного поля, створені першою, другою та третьою магнітними системами, причому, кожна з відповідних котушок у першій магнітній системі та другій магнітній системі вбудована у відповідну феромагнітну екрануючу структуру.

Фіг. 13 є видом в плані, що показує змодельовані лінії магнітного поля, створені першою, другою та третьою магнітними системами.

20 На Фіг. 14a і 14b показано результати одночасткового моделювання в конфігурації, зображених на Фіг. 6, 7, 8 і 13.

На Фіг. 15, 16 і 17 показано, відповідно, змодельовані траєкторії заряджених частинок з початковими радіальними положеннями 1,5 м, 3,0 м і 4,5 м, кожна для відношень v_z/v_R 0,5, 1,5, 2,5.

25 Фіг. 18; 19; 20; 21A, 21B; 22A, 22B; 23A, 23B є видами в поперечному перерізі відповідних обладнань з магнітним віддзеркаленням.

Детальний опис

Як загальновідомо, пристрої утримання плазми можуть базуватися як на відкритих лініях магнітного поля, так і на закритих лініях магнітного поля.

30 Конфігурація закритої лінії поля може бути реалізована, наприклад, за допомогою тороїдального магнітного поля. Прикладом такого пристрою є токамак.

Пристрої утримання плазми з відкритою лінією поля, як відомо з рівня техніки, можуть працювати за принципом магнітного віддзеркалення, де заряджені частинки плазми відбиваються в зонах збільшення щільності магнітного потоку на відповідних кінцях області утримання.

35 Хоча визнано здатними забезпечити утримання плазми, пристроями утримання плазми з відкритою лінією поля, але вони завжди матимуть витік заряджених частинок із векторами швидкостей, достатньо узгодженими з лініями магнітного поля. Якщо говорити точніше, ефект віддзеркалення буде мати місце для всіх частинок у діапазоні кутів наближення за межами конуса втрат, визначеного кутом нахилу спіралі обертання зарядженої частинки навколо ліній магнітного поля.

40 Межі конуса втрат визначаються коефіцієнтом дзеркальності r_{mirror} , який визначається як співвідношення між максимальною щільністю магнітного потоку в зоні віддзеркалення B_{mirror} і мінімальною щільністю магнітного потоку B_{central} у центральній зоні пристрою з магнітним віддзеркаленням, слідуючи за лінією магнітного поля:

$$45 \quad r_{\text{mirror}} = \frac{B_{\text{mirror}}}{B_{\text{central}}},$$

Тоді кут, що визначає конус втрат, дорівнює:

$$\alpha_{\text{cone}} = \arccos \frac{1}{\sqrt{r_{\text{mirror}}}}.$$

50 Таким чином, можна побачити, що великий коефіцієнт дзеркальності призведе до малого конуса втрат, так що вилетить лише частинка, швидкість якої найбільше узгоджується з лініями поля. І навпаки, низький коефіцієнт дзеркальності призведе до більшого конуса втрат.

Надпровідні котушки за цим описом можуть бути виготовлені та розташовані з використанням методів, матеріалів, сполук, тощо, відомих з рівня техніки.

Відповідні надпровідні матеріали можуть включати матеріали YBCO, Bi2223, 2212, Nb3SN, NbTi та/або MgB2.

55 Надпровідні котушки в цьому описі можуть бути, наприклад, так званими високотемпературними надпровідними котушками.

Як відомо в даній галузі техніки, надпровідна котушка може мати внутрішню структуру. Наприклад, у кожній надпровідній котушці надпровідний матеріал може бути виконаний у вигляді ниток, жил, кабелів, мотузок, тощо, використовуючи методи, загальновідомі в даній галузі техніки. поперечний переріз котушки, як згадується в цьому описі, слід розуміти як охоплюючу оболонку цієї внутрішньої структури.

Наприклад, надпровідні котушки в цьому описі можуть бути виготовлені та скомпоновані з використанням методів, матеріалів, сполук, тощо, як описано в статті D Uglietti: Огляд комерційних високотемпературних надпровідних матеріалів для великих магнітів: від проводів і стрічок до кабелів і провідників, (Supercond. Sci. Technol 32 (2019) 053001 (29 pp), <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab06a2>), яка включена тут шляхом посилання.

Крім того, надпровідні котушки можуть бути охолоджені за допомогою методів, взагалі відомих в даній галузі техніки.

Фіг. 18 є видом у поперечному перерізі обладнання 2100 з магнітним віддзеркаленнями. Обладнання 2100 з магнітним віддзеркаленням є оберально симетричним або, принаймні, по суті оберально симетричним, навколо осі симетрії А.

Обладнання 2100 може використовуватися для утримання плазми та може мати звичайне екранування 2102, наприклад, нейтронне екранування 2102, яке відоме в даній галузі техніки. Зокрема, обладнання 2100 з магнітним віддзеркаленням може бути частиною термоядерного реактора та/або застосовуватися в термоядерному реакторі.

Як видно з Фіг. 18, обладнання 2100 має множину надпровідних котушок 2104, 2105, розташованих поздовжньо вздовж осі симетрії А. Кожна надпровідна котушка 2104, 2105 може бути виконана у вигляді кругової петлі, як на Фіг. 18, і може бути призначена для пропускання постійного струму для створення області 2106 утримання плазми відкритого поля, як відомо в даній галузі техніки.

Область 2106 утримання плазми, таким чином, простягається в поздовжньому напрямку обладнання 2100 з магнітним віддзеркаленням, вздовж осі А симетрії, крізь обладнання 2100, причому, лінії 2112 магнітного поля також проходять уздовж поздовжнього напрямку.

У конфігурації на Фіг. 18, як видно з цієї фігури, множина надпровідних котушок 2104, 2105 розташована коаксіально відносно осі симетрії А. Крім того, надпровідні котушки розташовані поздовжньо відносно осі симетрії А. Крім того, як це типово для компонування типу магнітної пляшки, кожна надпровідна котушка виконана для пропускання відповідних струмів в одному напрямку, що позначено крапками та хрестиками на Фіг. 18.

Область 2106 утримання плазми на кожному з двох кінців обмежена відповідною зоною 2108 віддзеркалення зі збільшеною щільністю магнітного потоку відносно центральної зони 2110 області 2106 утримання плазми, як видно з відстані між лініями магнітного поля в кожній зоні 2108 віддзеркалення і центральній зоні 2110, як відомо з рівня техніки.

Відповідна надпровідна котушка 2105 з множини надпровідних котушок 2105, 2106 розташована поруч із кожною відповідною зоною 2108 віддзеркалення. Крім того у прикладі на Фіг. 18 відповідна надпровідна котушка 2105 розташована радіально за межами відповідної зони 2108 віддзеркалення.

Як видно з Фіг. 18, надпровідна котушка 2106 має поперечний переріз у площині, що перетинає лінію 2112 магнітного поля крізь зону віддзеркалення, таким чином відповідаючи площині на фіг. 18, яка має витягнуту форму в напрямку вздовж лінії 2112 магнітного поля.

Альтернативно, як також видно з Фіг. 18, це можна сформулювати так, що надпровідна котушка 2106 має поперечний переріз, витягнутий у поздовжньому напрямку по відношенню до обладнання 2100 з магнітним віддзеркаленням, і/або надпровідна котушка 2106 має поперечний переріз, витягнутий в напрямку вздовж осі симетрії А.

У прикладі на Фіг. 2 поперечний переріз є прямокутним, має розмір у напрямку вздовж лінії 2112 магнітного поля та/або поздовжньому напрямку обладнанню 2100 з магнітним віддзеркаленням та/або в напрямку вздовж осі симетрії А приблизно вдвічі більше, ніж розмір, перпендикулярний цьому напрямку, тобто радіально в обладнанні 2100 з магнітним віддзеркаленням.

На Фіг. 19 показано подальше обладнання 2200 з магнітним віддзеркаленням. Це обладнання має ті ж характеристики, що й обладнання 2100 на Фіг. 1, за винятком того, що кожна з надпровідних котушок 2206, що прилягає до кожної відповідної зони 108 віддзеркалення, має трубчасто-сегментний поперечний переріз, тобто має загальну форму круглого сегмента, ніби утвореного з частини труби.

Таким чином, поперечний переріз кожної надпровідної котушки 2105 є таким, що сегмент 2307а периметра площі поперечного перерізу, направлений до зони 2108 віддзеркалення, є опуклим, якщо дивитися ззовні сегмента 2307а периметра.

Крім того, сегмент 2307b периметра площі поперечного перерізу кожної надпровідної котушки 2306, направлений від зони віддзеркалення, є увігнутим, якщо дивитися ззовні сегмента 2307b периметра.

Природно, інші криволінійні поперечні перерізи однаково можливі, не обов'язково слідуючи частині кругового сегмента, з опуклими та увігнутими сегментами периметра, як у попередніх двох абзацах.

Крім того, у прикладі на Фіг. 19 сегмент 2307a периметра площі поперечного перерізу, направлений в бік зони 2108 віддзеркалення, проходить паралельно сегменту 2307b периметра площі поперечного перерізу, направлений від зони віддзеркалення.

На Фіг. 20 показаний ще одне обладнання 2300 з магнітними віддзеркаленням, яке не відповідає цій концепції винаходу, але представлено як приклад, корисний для розуміння концепції винаходу. Обладнання 2300 з магнітним віддзеркаленням має ті ж характеристики, що й обладнання 2100 на Фіг. 1, за винятком того, що кожна з надпровідних котушок 2406, що прилягають до кожної відповідної зони 2108 віддзеркалення, має круглий поперечний переріз, тобто не є подовженою.

Було виконано моделювання магнітного поля для оцінки конструкцій обладнання 2100 з магнітним віддзеркаленням на Фіг. 18, обладнання 2200 на Фіг. 19, обладнання 2300 на Фіг. 20.

В таблиці 1 показано результати моделювання, де:

- B_{coil} - максимальна щільність магнітного потоку в кожній котушці 2105, що прилягає до зони 2108 віддзеркалення,
- B_{mirror} - максимальний магнітний потік в зоні 2108 віддзеркалення,
- $B_{central, outer}$ - це щільність магнітного потоку в площині Р симетрії на радіально самому зовнішньому краю центральної зони 110,
- $B_{central, avg}$ - щільність магнітного потоку в площині Р симетрії, радіально усереднена крізь центральну зону 110, і
- R є внутрішнім радіусом обладнання 2100, 2200, 2400 з магнітними віддзеркаленням, останній рядок таблиці 1 показує добуток $B_{central, avg}$ і R .

Таблиця 1

Обладнання	2300 (Фіг. 20)	2100 (Фіг. 18)	2200 (Фіг. 19)
B_{coil} (Т)	23,0	23,1	23,1
B_{mirror} (Т)	7,67	10,41	15,6
B_{coil} / B_{mirror}	3,00	2,22	1,48
$B_{central, outer}$ (Т)	1,90	1,89	2,08
$B_{mirror} / B_{central, outer}$	4,03	5,5	7,50
$B_{central, avg} \times R$	6,0	6,0	6,0

Моделювання було виконано з використанням стінки 2102 товщиною 700 мм, початкового внутрішнього радіуса R 3300 мм обладнання з магнітним віддзеркаленням у площині Р симетрії і відстані 5000 мм між площиною Р симетрії та котушками 2105.

Моделювання було виконано, припускаючи постійну щільність струму в кожній надпровідній котушці та з обмеженням, що максимальна щільність магнітного потоку в кожній котушці 2105, що прилягає до зони 2108 віддзеркалення, не повинна перевищувати приблизно 23 Т, що є типовим значенням для щільності при пробі магнітного потоку для відповідної надпровідної котушки.

Крім того, радіус кожного обладнання з магнітним віддзеркаленням змінювався таким чином, щоб добуток $B_{central, avg} \times R$ середньої щільності магнітного потоку $B_{central, avg}$ у площині Р симетрії і внутрішнього радіуса R обладнання з магнітним віддзеркаленням, останній, таким чином, приблизно відповідає радіусу області 1206 утримання плазми у площині Р симетрії, було зафіксовано на рівні 6,0 Т м.

У результатах таблиці 1, які відображають вищезазначене обмеження конструкції, B_{coil} у кожному випадку є близьким до 23 Т. Слід зазначити, що завдяки лінійній природі магнітних полів, поточні результати можуть бути легко масштабовані для інших максимальних щільностей магнітного потоку котушки, що перевищують 23 Т, для яких результати однаково дійсні.

Як видно з таблиці 1, витягнутий поперечний переріз котушки в обладнанні 2200 з магнітним віддзеркаленням дозволяє отримати більш високу щільність магнітного потоку B_{mirror} в зоні

віддзеркалення, враховуючи обмеження не перевищувати щільність магнітного потоку приблизно 23 Т в котушці, у порівнянні з круглою не витягнутою котушкою 2105 обладнання 2300 з магнітним віддзеркаленням на Фіг. 20. Крім того, трубчасто-сегментний поперечний переріз котушки 2105 обладнання 2400 з магнітним віддзеркаленням на Фіг. 20 дозволяє ще

5 більший B_{mirror} , порівняно з фіг... 19 і 18.

Щільність $B_{\text{central, outer}}$ магнітного потоку, поза центральною зоною, залишається приблизно постійною в кожному обладнанні з магнітним віддзеркаленням. Таким чином, збільшення B_{mirror} на Фіг. 18 і 19 порівняно з Фіг. 20 може перетворитися на збільшений коефіцієнт дзеркальності $B_{\text{mirror}}/B_{\text{central, outer}}$ обладнання з магнітним віддзеркаленням, враховуючи фіксований добуток

10 $B_{\text{central, avg}} \times R$.

Дана концепція винаходу однаково застосовна до обладнання з магнітним віддзеркаленням, у якому множина надпровідних котушок має першу магнітну систему, що включає першу множину концентрично розташованих круглопетлевих надпровідних котушок, яка має першу надпровідну котушку, призначену для пропускання струму в першому напрямку; і другу надпровідну котушку, призначену для пропускання струму у другому напрямку, протилежному

15

першому напрямку; і другу магнітну систему, що має другу множину концентрично розташованих круглопетлевих котушок, розташованих дзеркально симетрично першій магнітній системі відносно площини симетрії, розташованої між першою магнітною системою та другою магнітною системою. Дана концепція та її переваги будуть детально обговорені в інших

20

частинах цього опису. Фігури 21А та 21В показують таке обладнання 3100 з магнітним віддзеркаленням, де Фіг. 21А є виглядом поперечного перерізу обладнання 2200 з магнітним віддзеркаленням, а Фіг. 21В є крупним планом окремого квадранта Фіг. 21А, який завдяки обертальній та дзеркальній симетрії є характерним для всіх чотирьох квадрантів поперечного перерізу, показаного на Фіг. 21А.

25

Обладнання 3100 з магнітним віддзеркаленням є обертально симетричним або, принаймні, по суті обертально симетричним навколо осі А симетрії.

Обладнання 3100 з магнітним віддзеркаленням може застосовуватися для утримання плазми та може мати звичайне екранування 2102, наприклад, нейтронне екранування 2102, відоме в даній галузі техніки. Зокрема, обладнання 2100 може бути встановлений в термоядерному реакторі та/або застосовуватися в термоядерному реакторі.

30

Як видно з Фіг. 21А, обладнання 3100 з магнітним віддзеркаленням має множину надпровідних котушок 2204, 2206а, 2206b, розташованих поздовжньо вздовж осі А симетрії. Кожна надпровідна котушка 2204, 2206а, 2206b може бути розташована в круговій петлі, як на Фіг. 21А/21В, і може бути виконана для кожного пропускання постійного струму, призначеного для створення зони 2106 утримання плазми відкритого поля.

35

Область 2106 утримання плазми, таким чином, простягається в поздовжньому напрямку, вздовж осі симетрії А, крізь обладнання 3100 з магнітним віддзеркаленням, при цьому лінії 2112 магнітного поля в зоні 2106 утримання плазми також проходять у поздовжньому напрямку.

40

Зокрема, надпровідні котушки 2206а і 2206b, розташовані над площиною Р симетрії, утворюють першу магнітну систему, в якій котушка 2206а виконана з можливістю пропускання постійного струму в першому напрямку, а котушка 2206b виконана з можливістю пропускання постійного струму в другому, протилежному напрямку, як показано крапками й хрестиками на Фіг. 21В.

45

Крім того, надпровідні котушки 2206а і 2206b, розташовані нижче площини Р симетрії, утворюють другу магнітну систему, розташовану з дзеркальною симетрією щодо першої магнітної системи відносно площини Р симетрії, яка, таким чином, розташована між першою магнітною системою та другою магнітною системою.

Завдяки такому компонуванню може бути створена кільцева зона 2106 утримання, як

50

детально описано в іншому місці цього опису. Крім того, третя магнітна система, що має щонайменше одну надпровідну котушку, як правило, множину надпровідних котушок, а у прикладі на Фіг. 21А і 21В дві надпровідні котушки 2104, може бути розташована радіально поза областю 2106 утримання плазми.

Область 2106 утримання плазми на кожному з двох кінців обмежена відповідною зоною 2108 віддзеркалення зі збільшеною щільністю магнітного потоку відносно центральної зони 2110 області 2106 утримання плазми, як можна бачити по відстані між лініями магнітного поля в кожній зоні 2108 віддзеркалення та центральній зоні 2110.

55

Надпровідні котушки 2206а, 2206b першої магнітної системи та другої магнітної системи розташовані поруч із відповідною зоною 2108 віддзеркалення. У прикладі на Фіг. 21А та 21В надпровідні котушки 2206а розташовані радіально за межами відповідної зони 2108

60

віддзеркалення, а надпровідні котушки 2206b розташовані радіально всередині відповідної зони 2206a віддзеркалення.

Як видно з Фіг. 21A і 21B, кожна надпровідна котушка 2206a, 2206b першої магнітної системи та другої магнітної системи має поперечний переріз у площині, що перетинає лінію магнітного поля 2112 крізь згадану зону віддзеркалення, таким чином відповідаючи площині 21A/21B, яка має витягнуту форму в напрямку вздовж лінії 2112 магнітного поля. У прикладі на Фіг. 21A та 21B поперечний переріз має форму півмісяця, який має розмір у напрямку вздовж лінії 2112 магнітного поля, що приблизно вдвічі більший розміру, перпендикулярно цьому напрямку.

Таким чином, кожна з надпровідних котушок 2206a, 2206b, прилегла до кожної відповідної зони 2108 віддзеркалення, має поперечний переріз у формі півмісяця. Зокрема, поперечний переріз кожної надпровідної котушки є таким, що сегмент 2207a периметра площі поперечного перерізу, направлений до зони 2108 віддзеркалення, є опуклим, якщо дивитися ззовні сегмента 2207a периметра.

Альтернативно, як також видно з Фіг. 21A і 21B, можна сказати, що надпровідні котушки 2206a, 2206b мають поперечний переріз, витягнутий у поздовжньому напрямку відносно обладнання 3100 з магнітним віддзеркаленням та/або надпровідні котушки 2206a, 2206b мають поперечний переріз витягнутий вздовж осі симетрії A.

Крім того, як показано в прикладі на Фіг. 21A і 21B, сегменти 2207b периметра, направлені від зони 2108 віддзеркалення, можуть бути плоскими.

Інші витягнуті поперечні перерізи, такі як прямокутні (див. Фіг. 18), однаково можливі.

На Фіг. 22A і 22B показаний ще одне обладнання 3200 з магнітним віддзеркаленням.

Обладнання 3200 з магнітним віддзеркаленням має ті самі характеристики, що й обладнання 3100 з магнітним віддзеркаленням на Фіг. 1, за винятком того, що кожна з надпровідних котушок 2206, що прилягає до кожної відповідної зони 108 віддзеркалення, має поперечний переріз, подібний до трубчатого сегмента, тобто має загальну форму сегмента кола, ніби утвореного з частини труби. Природно, інші вигнуті поперечні перерізи однаково можливі, не обов'язково, слідуючи шляху кругового сегмента.

Таким чином, поперечний переріз кожної надпровідної котушки є таким, що сегмент 2207a периметра площі поперечного перерізу, направлений до зони 2108 віддзеркалення, є опуклим, якщо дивитися ззовні сегмента 2207a периметра.

Крім того, сегмент 2207b периметра площі поперечного перерізу кожної надпровідної котушки 2306, направлений від зони віддзеркалення, є увігнутим, якщо дивитися ззовні сегмента 2207b периметра.

Природно, інші вигнуті поперечні перерізи однаково можливі, не обов'язково слідуючи контуру кругового сегмента, з опуклими та увігнутими сегментами периметра, як описано у попередніх двох абзацах.

Крім того, у прикладі на Фіг. 22A і 22B сегмент 2207a периметра площі поперечного перерізу, направлений в бік зони 2108 віддзеркалення, проходить паралельно сегменту 2207b периметра зони поперечного перерізу, направленої від зони віддзеркалення.

На Фіг. 23A і 23B показаний ще одне обладнання 2400 з магнітним віддзеркаленням, який не відповідає концепції винаходу, але представлений як приклад, корисний для розуміння концепції винаходу. Обладнання 2400 з магнітним віддзеркаленням має ті самі характеристики, що й обладнання 2100 з магнітним віддзеркаленням на Фіг. 21A та 21B, за винятком того, що кожна з надпровідних котушок 2206a, 2206b, що прилягають до кожної відповідної зони 2108 віддзеркалення, має круглий поперечний переріз, тобто поперечний переріз, який не є подовженим.

Було виконано моделювання магнітного поля для оцінки конструкцій пристрою 3100 з магнітними дзеркалами на Фіг. 21A і 21B, пристрою 3200 з магнітними дзеркалами на Фіг. 22A і 22B і пристрою 3300 з магнітними дзеркалами на Фіг. 23A і 23B.

Таблиця 2 показує результати моделювання, де:

- B_{coil} - це максимальна щільність магнітного потоку в кожній котушці 2206a, 2206b поруч із зоною 2108 віддзеркалення,

- B_{mirror} - максимальний магнітний потік в зоні 2108 віддзеркалення,

- $B_{central, outer}$ - це максимальна щільність магнітного потоку в площині симетрії R, тобто в центральній зоні 110, і

- R - внутрішній радіус обладнань 3100, 3200, 3300 з магнітним віддзеркаленням, останній рядок таблиці 2 показує добуток $B_{central, avg}$ і R.

Таблиця 2

Обладнання	3300 (Фіг. 23A/23B)	3100 (Фіг. 21A/21B)	3200 (Фіг. 22A/22B)
B_{coil} (Т)	23,0	23,0	23,0
B_{mirror} (Т)	8,12	14,05	15,30
$B_{\text{coil}}/B_{\text{mirror}}$	2,83	1,66	1,50
$B_{\text{central, outer}}$ (Т)	1,12	1,82	2,01
$B_{\text{mirror}}/B_{\text{central, outer}}$	7,28	7,77	7,66
$B_{\text{central, avg}} \times R$	3,40	5,58	6,31

Моделювання було виконано для товщини стінки 2102-700 мм, внутрішнього радіуса R обладнання з магнітним віддзеркаленням у площині Р симетрії - 3300 мм і відстані між площинами Р симетрії і котушками 2206а, 2206b-5000 мм.

Моделювання було виконано в припущенні про постійну щільність струму в надпровідній котушці та з обмеженням, що максимальна щільність магнітного потоку в кожній котушці 2105, що прилягає до зони 2108 віддзеркалення, не повинна перевищувати приблизно 23 Т, що є типовим значенням для пробивної щільності магнітного потоку для відповідної надпровідної котушки.

Крім того, радіус кожного обладнання з магнітним віддзеркаленням змінювався таким чином, щоб відношення $B_{\text{coil}}/B_{\text{mirror}}$ було максимальним, що було еквівалентно максимізації B_{mirror} , завдяки постійній B_{coil} .

У результатах таблиці 2, які відображають вищезазначене проектне обмеження, B_{coil} у кожному випадку становить 23,0 Т. Слід зазначити, що через лінійну природу магнітних полів, поточні результати можна легко масштабувати для інших максимальних щільностей магнітного потоку котушок, ніж 23,0 Т, для яких результати однаково дійсні.

Як видно з таблиці 2, подовжені поперечні перерізи котушки у формі півмісяця в обладнанні 3100 з магнітним віддзеркаленням дозволяють отримати більш високу щільність B_{mirror} магнітного потоку в зоні віддзеркалення, враховуючи обмеження не перевищувати щільність магнітного потоку приблизно 23 Т в котушці порівняно з круглою не подовженою котушкою 2206а, 2206b обладнання 3300 з магнітним віддзеркаленням на Фіг. 23A/23B. Крім того, трубчасто сегментний поперечний переріз котушок 2206а, 2206b обладнання 3200 з магнітним віддзеркаленням на Фіг. 22A і 22B дозволяє отримати ще більший B_{mirror} порівняно з Фіг. 23A/23B і 21A/21B.

Таким чином, у поточній оптимізації, щільність магнітного потоку $B_{\text{central, outer}}$ центральної зони залишається приблизно 7-8 Т, тоді як подовжені та трубчасті поперечні перерізи сегментів дозволяють значно збільшити добуток $B_{\text{central, avg}} \times R$.

Концепція винаходу була в основному описана вище з посиланням на приклади варіантів здійснення. Однак, як це легко зрозуміти фахівцю в даній галузі техніки, інші варіанти здійснення, ніж ті, що розкриті вище, однаково можливі в межах концепції винаходу, яка визначена доданою формулою винаходу. Зокрема, інші подовжені поперечні перерізи, ніж ті, що конкретно обговорюються тут, однаково можливі в межах обсягу формули винаходу. Зокрема, поперечні перерізи у вигляді півмісяця, такі як перерізи на Фіг. 21A та 21B, однаково застосовні, наприклад, до обладнань з магнітним віддзеркаленням типу пляшки, таких як перерізи на Фіг. 18, причому, прямокутні перерізи, такі як перерізи на Фіг. 18, однаково застосовні до обладнання з магнітним віддзеркаленням, наприклад, на Фіг. 21A та 21B.

Наступна частина цього опису відноситься до пристрою утримання плазми та способу утримання плазми.

Багато зусиль докладається для розробки реактора для керованого термоядерного синтезу на землі. Найбільш багатообіцяючим є процес термоядерного синтезу між ізотопами водню дейтерію (^2H) і тритію (^3H). У процесі термоядерного синтезу дейтерію і тритію утворюється альфа-частинка ^4He , що має кінетичну енергію приблизно 3,5 MeV, і нейтрон, який має кінетичну енергію приблизно 14,1 MeV.

Щоб відбувся синтез, ядра повинні бути у формі плазми з температурою близько 150 мільйонів кельвінів. Забезпечення утримання такої плазми залишається серйозною проблемою.

Відомо кілька різних магнітних конфігурацій для утримання плазми.

Утримання плазми включає утримання заряджених частинок плазми. Крім того, можуть бути бажаними різні властивості, корисні для стабільності обмеженої плазми.

Відомою конструкцією є магнітне дзеркало. У ньому частинки слідує за лініями магнітного поля та відбиваються в зонах збільшення щільності магнітного потоку на відповідних кінцях пристрою. Незважаючи на здатність утримувати плазму, як було продемонстровано експериментально, вона пов'язана з різними проблемами нестабільності плазми. Щоб вирішити ці проблеми, у попередньому рівні техніки були запропоновані різні згорнуті у спіраль необротально-симетричні геометрії, такі як конструкція "Мінімум В" ("Minimum B"), що нагадує тенісний м'яч, або "Біконічний кут" ("Biconic Cusp").

Ще одна відома конструкція - токамак. У токамаку для утримання використовується тороїдальне, тобто кільцевої форми, поле утримання. Використання токамака також пов'язане з різними проблемами стабільності плазми, такими як розділення зарядів.

Метою цього винаходу є створення покращеного пристрою та способу утримання плазми, зокрема, для використання в термоядерних реакторах.

З цією метою, згідно з першим аспектом, пропонується пристрій для утримання плазми, що має першу магнітну систему, що включає першу множину концентрично розташованих круглопетлевих котушок, що містить першу котушку, призначену для пропускання струму в першому напрямку, і другу котушку, призначену для пропускання струму у другому напрямку, протилежному першому напрямку; і другу магнітну систему, що включає другу множину концентрично розташованих круглопетлевих котушок, розташованих дзеркально симетрично першій магнітній системі відносно площини симетрії, розташованої між першою магнітною системою та другою магнітною системою, створюючи кільцеву зону утримання плазми з площиною симетрії з магнітним полем, нормальним до площини симетрії, на площині симетрії.

Під кільцевою зоною утримання плазми слід розуміти обертально-симетричну область, в якій утримуються заряджені частинки плазми, включаючи випадки, що мають, наприклад, топологію типу кільця або диска.

Таким чином, результуюча конфігурація магнітного поля може утримувати заряджені частинки за допомогою статичних аксіальних і радіальних полів у конфігурації магнітного дзеркала з відкритою лінією поля.

Пристрій з першою котушкою, розташованою для пропускання струму в першому напрямку, і другою котушкою, розташованою для пропускання струму в протилежному, другому, напрямку в кожній з першої магнітної системи та другої магнітної системи дозволяє створення області високої щільності магнітного потоку між першою та другою котушками при збереженні відносно нижчої щільності магнітного потоку поблизу площини симетрії. Порівняно зі звичайним обладнанням магнітного віддзеркалення, це дозволяє збільшити коефіцієнт дзеркальності, таким чином зменшуючи розмір конуса втрат і дозволяючи краще утримувати плазму.

Крім того, порівняно з токамаком, при обмеженні плазми можна уникнути ефектів розділення зарядів, коли для стабільності плазми може не знадобитися індукований струм плазми. В результаті квазістатичної плазми, тобто без глобального плазмового струму, можна, у свою чергу, уникнути магнітогідродинамічних нестабільностей. Крім того, термоядерний реактор може працювати в безперервному (сталому) стані без стрибків струму.

Крім того, отримана конфігурація магнітного поля може дозволити нескладний спосіб нагрівання плазми.

Перша множина концентрично розташованих котушок може, наприклад, бути спроектована ідентично другій множині концентрично розташованих котушок. Це особливо простий спосіб досягнення бажаної конфігурації магнітного поля.

Пристрій може додатково мати третю магнітну систему, розташовану радіально поза областю утримання плазми, причому, третя магнітна система має щонайменше одну круглопетльову котушку.

Таким чином, можна виконати строго радіально зростаюче магнітне поле, що може бути корисним для стабільності обмеженої плазми, додатково вдосконалюючи звичайне магнітне віддзеркалення.

Крім того, пристрій з третьою магнітною системою може дозволити організувати увігнуте магнітне поле у всій області утримання плазми, що може бути корисним для стабільності обмеженої плазми.

Таким чином, може бути створений ротаційно-симетричний пристрій для утримання плазми відкритого поля, який має високий коефіцієнт дзеркальності та має властивості, корисні для стабільності плазми.

Крім того, третя магнітна система може дозволити керувати обмеженою плазмою шляхом регулювання струму в круглопетльовій котушці третьої магнітної системи.

Третя магнітна система може мати першу котушку, розташовану з однієї сторони площини симетрії у першій магнітній системі, і другу котушку, розташовану з протилежного боку площини

симетрії, причому, друга котушка розташована з дзеркальною симетрією відносно першої котушки.

5 Кожна перша множина концентрично розташованих котушок у першій магнітній системі та друга множина концентрично розташованих котушок у другій магнітній системі можуть бути вбудовані у відповідні феромагнітні структури. Це збільшує магнітний потік через відносно вищу проникність феромагнітного матеріалу, призводячи до більш сильного магнітного поля, а отже, до кращого утримання, для заданого струму котушки.

10 Необов'язково, згадана феромагнітна структура не покриває щонайменше одну котушку з відповідної множини котушок у напрямку до площини симетрії. Це екранує магнітний потік у напрямку від площини симетрії та спрямовує магнітний потік у напрямку до площини симетрії, тобто до плазми. Таким чином, досягається більш ефективне екранування для заданого струму котушки.

Вказана феромагнітна структура може бути феромагнітною сталлю.

Пристрій згідно з першим аспектом може використовуватися для утримання плазми.

15 Пристрій згідно з першим аспектом може використовуватися в термоядерному реакторі.

Відповідно до другого аспекту, пропонується спосіб утримання плазми, що забезпечує, в першій магнітній системі, яка має першу множину концентрично розташованих круглопетлевих котушок, де є перша котушка, по якій протікає струм у першому напрямку, і друга котушка, по якій протікає струм у другому напрямку, протилежному першому напрямку; і в другій магнітній системі, яка має другу множину концентрично розташованих круглопетлевих котушок, по якій протікають струми з дзеркальною симетрією щодо першої магнітної системи відносно площини симетрії, яка розташована між першою магнітною системою та другою магнітною системою, створення область утримання кільцевої плазми з площиною симетрії та магнітним полем, нормальним до площини симетрії.

25 Варіанти здійснення та переваги цього другого аспекту можуть, як правило, бути подібними або такими ж, як і переваги першого варіанту здійснення.

Спосіб може додатково включати керування обмеженою плазмою шляхом регулювання струму в третій магнітній системі, розташованій радіально за межами області утримання плазми.

30 Керування може включати зміну радіуса області утримання плазми, що, таким чином, у свою чергу, може змінювати радіус плазми.

Спосіб може додатково включати нагрівання плазми шляхом введення пучка іонів в зону радіально за межами області утримання плазми або радіально всередині області утримання плазми, дозволяючи іонам з пучка іонів дрейфувати в область утримання плазми.

35 На відміну від існуючих рішень, таких як токамаки або подібні пристрої, де магнітне поле, створене для утримання плазми, також відхиляє від плазми іони, що надходять ззовні, і нагрівання потрібно виконувати за допомогою нейтральних променів, які проникатимуть крізь магнітне поле, а потім іонізуються лише один раз усередині плазми, тут високоенергетичні іони можна зручно та просто додати до обмеженої плазми або забезпечити початковий нагрів плазми для створення умов термоядерного синтезу, оскільки поточна конфігурація магнітного поля може затягнути іони в область утримання плазми, а не відхиляти їх. Це може призвести до менш складної процедури та може додатково зменшити втрати частинок.

40 Згідно з третім аспектом, пропонується пристрій з магнітним віддзеркаленням та/або пристрій для утримання частинок, що має першу магнітну систему, що включає першу множину концентрично розташованих круглопетлевих котушок, яка має першу котушку, призначену для пропуску струму в першому напрямку і другу котушку, призначену для пропускання струму в другому напрямку, протилежному першому напрямку; і другу магнітну систему, що включає другу множину концентрично розташованих круглопетлевих котушок, розташованих дзеркально симетрично щодо першої магнітної системи відносно площини симетрії, розташованої між першою магнітною системою та другою магнітною системою, створюючи кільцеву область утримання частинок з площиною симетрії магнітним полем, нормальним до площини симетрії на площині симетрії.

Варіанти здійснення та переваги, обговорювані разом з іншими аспектами в цьому винаході, сумісні з цим третім аспектом.

55 Відповідно до четвертого аспекту, пропонується спосіб утримання заряджених частинок, який забезпечує в першій магнітній системі з першою множиною концентрично розташованих круглопетлевих котушок, в якій перша котушка, по якій тече струм у першому напрямку, а друга котушка, по якій тече струм в другому напрямку, протилежному першому напрямку; і в другій магнітній системі, що містить другу множину концентрично розташованих круглопетлевих котушок, по якій тече струми дзеркально симетрично щодо першої магнітної системи відносно

площини симетрії, розташованої між першою магнітною системою та другою магнітною системою, створення кільцевої області утримання частинок з площиною симетрії з магнітним полем, нормальним до площини симетрії.

Варіанти здійснення та переваги, обговорювані разом з іншими аспектами в цьому винаході, сумісні з цим третім аспектом.

Як загальновідомо, пристрої для утримання плазми можуть базуватися як на відкритих лініях магнітного поля, так і на закритих лініях поля.

Пристрої із закритими лініями магнітного поля можуть, наприклад, мати тороїдальне магнітне поле. Прикладом такого пристрою є токамак.

Пристрої із закритими лініями магнітного поля можуть потенційно утримувати частинки плазми без витоку, оскільки частинки слідуватимуть за лініями поля, але інші проблеми, такі як дрейф у схрещених полях (ExB drift) через розділення зарядів і магніто-гідродинамічні (МГД(МНД)) ефекти, можуть спричинити вихід плазми. Необхідно вжити спеціальних заходів для видалення гелієвого попелу, таких як пульсація системи, що не забезпечує роботу в стаціонарному режимі.

Однією з головних проблем тороїдального поля є те, що іони не будуть утримуватися через дрейф у схрещених полях, спричинений розділенням зарядів.

У токамаку ця проблема може бути вирішена шляхом індукції струму в плазмі, де струм створює полоїдальне поле. Це призводить до того, що магнітне поле скручується вздовж тора, причому, полоїдальні та тороїдальні поля разом утворюють скручене магнітне поле. Це пом'якшує дрейф у схрещених полях, але створює додаткову проблему, оскільки плазма буде обмежена лише тоді, коли струм у внутрішній магнітній котушці зростає, тобто неможливо працювати у сталому стані.

Крім того, струм плазми буде призводити до кількох нестабільностей, пов'язаних з магнітогідродинамічними ефектами, наприклад, нестабільності Кінка (Kink instabilities). Це можна вирішити за допомогою різних компенсаційних котушок навколо корпусу реактора, але основні характеристики плазми все ще будуть нестабільними через великі магнітогідродинамічні ефекти.

Пристрої утримання плазми з лініями відкритого поля, як відомо з попереднього рівня техніки, можуть працювати за принципом магнітного віддзеркалення, при якому заряджені частинки плазми відбиваються в зонах збільшення щільності магнітного потоку на відповідних кінцях області утримання. Такі пристрої мають здатність працювати в стаціонарному режимі і, як правило, можуть мати менше проблем із розділенням зарядів, а також дозволяють легше поводитися з гелієвим попелом.

Хоча визнано здатними забезпечити утримання плазми, пристрої для утримання плазми з відкритими лініями поля завжди матимуть витік заряджених частинок з векторами швидкостей, достатньо узгодженими з лініями магнітного поля. Якщо говорити точніше, ефект віддзеркалення виникне для всіх частинок у діапазоні кутів наближення за межами конуса втрат, визначеного кутом нахилу спіралі обертання зарядженої частинки навколо силових ліній магнітного поля.

Розмір конуса втрат визначається коефіцієнтом дзеркальності r_{mirror} , який визначається як співвідношення між максимальною B_{max} і мінімальною B_{min} щільністю магнітного потоку за лінією магнітного поля:

$$r_{\text{mirror}} = \frac{B_{\text{max}}}{B_{\text{min}}}$$

Кут, який визначає конус втрат є таким:

$$\alpha_{\text{cone}} = \arccos \frac{1}{\sqrt{r_{\text{mirror}}}}$$

Таким чином, можна побачити, що високий коефіцієнт дзеркальності призведе до малого конуса втрат, так що вилетить лише частинка, швидкість якої найбільше узгоджується з лініями поля. І навпаки, низький коефіцієнт дзеркальності призведе до більшого конуса втрат.

Першою, відомою з літератури, властивістю ліній магнітного поля пристрою утримання плазми, пов'язаною з магніто-гідродинамічною стабільністю обмеженої плазми, є увігнуте магнітне поле, тобто магнітне поле, що має увігнуті лінії магнітного поля, якщо дивитися з за меж області утримання плазми та обмеженої плазми.

Друга, відома з літератури, властивість силових ліній магнітного поля пристрою утримання плазми, пов'язана з магніто-гідродинамічною стабільністю обмеженої плазми, є радіально точно зростаюче магнітне поле.

Фігури 1a, 1b і 1c показують першу магнітну систему 1 і другу магнітну систему 2, які можуть міститися в пристрої утримання плазми (порівняння з Фіг. 5a і 5b).

Перша магнітна система 1 має першу множину концентрично розташованих круглопетлевих котушок, розташованих навколо осі симетрії А, наприклад, як показано, першу, внутрішню котушку 11 і другу, зовнішню, котушку 12, яка розташована концентрично, радіально за внутрішньою котушкою 11.

Крім першої магнітної системи 1 є друга магнітна система 2, що має другу множину круглопетлевих котушок, також концентрично розташованих навколо осі А, але вертикально зміщену відносно першої магнітної системи. Друга магнітна система може, наприклад, як показано, мати першу внутрішню котушку 21 і другу зовнішню котушку 22, яка розташована концентрично внутрішній котушці 21 і радіально назовні внутрішньої котушки 21.

На Фіг. 1c показано поперечний переріз першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2 у площині поперечного перерізу по осі А симетрії.

Котушки 21, 22 другої магнітної системи 2 розташовані дзеркально симетрично щодо до котушок 11, 12 першої магнітної системи 1 відносно площини Р симетрії, яка знаходиться на однаковій відстані до кожної з першої магнітної системи 1 і до другої магнітної системи 2.

У цьому винаході можуть бути посилання на системи координат і напрямки відносно осі А та площини Р симетрії. Зокрема, координати та напрямки можуть бути описані з посиланням на циліндричну систему координат або декартову систему координат, кожна з яких має як початкову координату в перетині осі симетрії А і площини Р симетрії.

Декартова система координат із координатами, які називаються "x, y, z", "X, Y, Z", "A, B, C" тощо, повинна розумітися як така, що має перші дві осі координат "x, y", "X, Y", "A, B" або подібне, що лежать у площині Р симетрії, і третю вісь координат "z", "Z", "C" або подібне, що простягається як позитивний напрямок вгору (як показано на Фіг. 1-5) від початку координат вздовж осі симетрії А.

Якщо одиниці вимірювання просторових координат не вказано, маються на увазі метри або градуси. Якщо одиниця часу не вказана, мається на увазі секунди.

Циліндричну систему координат слід розуміти як таку, що має радіальний напрямок і координату ("R", "r" або подібне), що тягнеться від початку координат на перетині осі симетрії А і площини симетрії Р, напрямок азимута і координата ("phi", "Phi" або подібна), виміряна як кут повороту навколо осі симетрії А, а також осьовий напрямок і координата ("z", "Z", "C" або подібна), що простягається в позитивному напрямку від початку координат вгору вздовж осі симетрії А. Позитивний напрямок для напрямку азимута відповідає правилу правої руки відносно позитивного осьового напрямку.

Крім того, у цьому описі буде зроблено посилання на фігури, що показують змодельовані лінії магнітного поля (щільності магнітного потоку), тобто лінії рівного магнітного потенціалу, включаючи фігури 2, 4a, 4b, 9, 10, 11 і 12. Завдяки симетрії властивостей магнітних систем, описаних тут, властивостей магнітного поля такого квадранта є достатньо для опису конфігурації поля в цілому, тобто через дзеркальну симетрію відносно площини Р симетрії і обертальну симетрію навколо осі А. Таким чином, фігуру, що показує квадрант, слід інтерпретувати як розкриття поля та конфігурації магнітної системи у всіх чотирьох квадрантах, з урахуванням згаданих властивостей симетрії. Крім того, завдяки обертальній симетрії, фігури слід інтерпретувати як розкриття тривимірних магнітних полів і магнітних систем.

Ще, з посиланням на Фіг. 1c, перша множина концентрично розташованих котушок 11, 12 першої магнітної системи 1 може, як показано, бути спроектована ідентично другій групі концентрично розташованих котушок 21, 22 другої магнітної системи 2, з дотриманням дзеркальної симетрії.

На Фіг. 1c також показано напрямки струму котушки під час роботи першої магнітної системи та другої магнітної системи, які використовуються в пристрої для утримання плазми (див. Фіг. 5a та 5b).

У першій магнітній системі 1 струм внутрішньої котушки 11 протікає в напрямку до площини поперечного перерізу (позначено хрестиком) на правій стороні Фіг. 1c і за межі площини поперечного перерізу (позначено крапкою) у лівій частині Фіг. 1c, тобто проти годинникової стрілки, якщо дивитися зверху на першу магнітну систему. Навпаки, струм зовнішньої котушки 12 протікає в напрямку від площини поперечного перерізу (позначеної крапкою) праворуч на Фіг. 1c до площини поперечного перерізу (позначено хрестиком) у лівій частині Фіг. 1c, тобто за годинниковою стрілкою, якщо дивитися зверху на першу магнітну систему.

Таким чином, перша множина концентрично розташованих круглопетлевих котушок має першу котушку 11, виконану з можливістю пропуску струму в першому напрямку, і другу котушку

12, виконану з можливістю пропуску струму в другому напрямку, протилежному першому напрямку.

Подібним чином, дотримуючись дзеркальної симетрії відносно площини симетрії Р, у другій магнітній системі 2 струм внутрішньої котушки 21 налаштований так, щоб протікати в напрямку до площини поперечного перерізу (позначено хрестиком) на правій стороні Фіг. 1с і поз площину поперечного перерізу (позначено крапкою) у лівій стороні Фіг. 1с, тобто проти годинникової стрілки, якщо дивитися зверху на першу магнітну систему, а струм зовнішньої котушки 22 протікає в напрямку від площини поперечного перерізу (позначено крапкою) на правій стороні Фіг. 1с і в площину поперечного перерізу (позначено хрестиком) на лівій стороні Фіг. 1с, тобто за годинниковою стрілкою, якщо дивитися зверху на першу магнітну систему.

Таким чином, струми другої магнітної системи 2, при роботі з першою магнітною системою 1 і другою магнітною системою 2, розташовані дзеркально симетрично по відношенню до першої магнітної системи щодо площини Р симетрії, розташованої між першою магнітною системою 1 і другою магнітною системою 2.

Як показано векторною стрілкою 202, що вказує вектор В магнітного поля (щільності магнітного потоку), у площині Р симетрії, дзеркально-симетрична конфігурація струмів у першій магнітній системі 1 і другій магнітній системі 2 створює у площині Р симетрії, магнітне поле, перпендикулярне площині симетрії Р. Кільцеподібна, як правило, форма тороїда, область утримання плазми 206 (див. Фіг. 2, 5а і 5b), позначена приблизно пунктирним еліпсом, утворена в площині симетрії Р, як буде пояснено далі.

Таким чином, іншими словами, пристрій для утримання плазми може мати дві дископодібні магнітні системи 1, 2, звернені одна до одної в аксіальному напрямку, з простором між ними, де може бути обмежена плазма. Кожна магнітна система 1, 2 має щонайменше дві котушки 11, 12, 21, 22, в яких напрямки і величина струму створюють нормальний граничний стан магнітного поля в площині Р симетрії.

Крім того, з посиланням на Фіг. 1а, 1b і 1с, кожна з першої множини концентрично розташованих котушок 11, 12 у першій магнітній системі 1 і другої множини концентрично розташованих котушок 21, 22 у другій магнітній системі 2 може бути вбудовані у відповідні структури 204 сердечника, які можуть бути з феромагнітного матеріалу, такого як феромагнітна сталь. Альтернативно, структура 204 сердечника може бути з неферомагнітного матеріалу, такого як неферомагнітна сталь.

Необов'язково, як показано, відповідні структури 204 сердечника першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2 не покривають щонайменше одну котушку, як показано, всі котушки відповідної множини котушок у напрямку до площини Р симетрії, але покривають відповідні котушки 11, 12, 21, 22 у всіх інших напрямках.

Для цілей порівняння на Фіг. 9 показані змодельовані лінії магнітного поля прямої конфігурації магнітного віддзеркалення, що складається з двох котушок, тобто однієї котушки 1600 у кожній півкулі. Як типово для такої конфігурації прямого магнітного дзеркала (типу "пляшки"), магнітне поле відображає область 1602 з відносно низькою щільністю магнітного потоку поблизу площини Р симетрії і область 1604 з відносно високою щільністю магнітного потоку поблизу котушки 1600, створюючи область 206 утримання для заряджених частинок, засновану на принципі магнітного відбиття, як пояснено вище. Крім того, як видно радіально назовні області 206 утримання, тобто справа на Фіг. 9, відносно велика область поблизу площини симетрії відображається опуклими лініями магнітного поля, тоді як менша область ближче до котушки 1600 відображається увігнутими лініями магнітного поля, при цьому, перша, згідно з першою властивістю, обговорюваною вище, є не вигідною, а остання є вигідною. Крім того, можна відзначити, що в площині Р симетрії щільність магнітного потоку зменшується зі збільшенням радіуса.

Описана конфігурація магнітної системи робить магнітне поле нормальним до площини симетрії Р по всій площині Р симетрії, як видно з ліній магнітного поля, що перетинають площину Р симетрії під прямим кутом. На Фіг. 2, як і на Фіг. 1с, показані лінії магнітного поля в площині поперечного перерізу, що проходить крізь вісь А. Завдяки обертальній симетрії першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2, конфігурація магнітного поля також обертально симетрична, тому Фіг. 2 є репрезентативною для будь-якої такої площини поперечного перерізу і, отже, для всієї конфігурації поля. Зокрема, магнітне поле не має тороїдальної складової, тобто в напрямку, що вказує всередину або назовні площини поперечного перерізу на Фіг. 2, що є напрямком азимута, згаданим вище. Іншими словами, вектори магнітного поля лежать у площині поперечного перерізу будь-якої такої площини поперечного перерізу, що проходить крізь вісь А. Те саме стосується конфігурацій на Фіг. 9-13.

На Фіг. 2 показані лінії магнітного поля, що є результатом дзеркально-симетричної конфігурації струмів у першій магнітній системі 1 і другій магнітній системі 2, розглянутих вище разом з Фіг. 1a, 1b і 1c. Результуюча конфігурація магнітного поля призводить до кільцевої області 206 утримання, представленої приблизними пунктирними еліпсами, в яких можуть бути обмежені іони плазми. Область утримання плазми є радіально обмеженою між внутрішнім радіусом і зовнішнім радіусом, як підтверджено моделюванням. Іони плазми, утримувані в пристрої для утримання плазми, в області 206 утримання плазми в площині Р симетрії, будуть виконувати круговий обертальний рух у цій площині, завдяки магнітному полю, перпендикулярному до цієї площини. Як згадувалося, тороїдального поля немає. Отже, враховуючи відсутність тороїдальної складової магнітного поля, на іони в площині симетрії Р не буде діяти аксіальна сила Лоренца. Віддаляючись від площини симетрії в аксіальному напрямку, уздовж лінії поля, сила Лоренца може штовхати іон назад до площини симетрії, утримуючи іон на площині симетрії.

На відміну від ситуації в токамаку, де плазма утримується тороїдальним і полоїдальним полями, пристрій утримання згідно з цим винаходом утримує плазму аксіальними (паралельно осі А) і радіальними полями.

На фіг. 10 показана інша конфігурація, яка може міститися в пристрої утримання плазми, знову ж таки, виконаному з першою магнітною системою 1, що містить першу котушку 11, призначену для пропускання струму в першому напрямку; і другу котушку 12, виконану з можливістю пропускання струму в другому напрямку, протилежному першому напрямку (див. Фіг. 1c); і другою магнітною системою (не показано), що містить першу та другу концентрично розташовані круглопетльові котушки (не показані), розташовані дзеркально симетрично щодо першої магнітної системи відносно площини Р симетрії, розташованої між першою магнітною системою 1 і другою магнітною системою 2. Як і для прямого магнітного віддзеркалення на Фіг. 9, область утримання заряджених частинок, тобто область 206 утримання плазми, є площиною Р симетрії з магнітним полем, нормальним до площини симетрії на площині симетрії.

Так само, як обговорювалося вище з урахування Фіг. 9, як показано на Фіг. 10, а також очевидно на Фіг. 2, відповідним вибором геометрії котушок 11, 12 першої магнітної системи та другої магнітної системи 2 і струмів, що протікають в них, можна досягти конфігурації поля, що відображає область 1602 відносно низької щільності магнітного потоку поблизу площини Р симетрії та область 1604 відносно високої щільності магнітного потоку поблизу котушок 11, 12, та створення зони 206 утримання заряджених частинок на основі принципу магнітного віддзеркалення. Крім того, так само, як на Фіг. 10, якщо дивитися радіально ззовні зони 206 утримання, тобто справа на Фіг. 9, область 1602 поблизу площини симетрії відображається опуклими лініями магнітного поля, тоді як область 1604 відображається увігнутими лініями магнітного поля.

Крім того, як видно з порівняння Фіг. 10 (і Фіг. 2) з Фіг. 9, відповідний вибір геометрії котушок і струмів, що в них протікають, дозволяє значно збільшити щільність магнітного потоку в області 1604 відносно високої щільності магнітного потоку поблизу котушок 11, 12. Це може забезпечити вищий коефіцієнт дзеркальності, покращуючи утримання заряджених частинок у плазмі, завдяки зменшеному конусу втрат.

Фігури 3a і 3b показують першу магнітну систему 1, другу магнітну систему 2 і третю магнітну систему, які можуть міститися в пристрої утримання плазми (див. Фіг. 5a і 5b). Якщо інше не зазначено нижче, магнітні системи на Фіг. 3a, 3b і Фіг. 4 мають такі ж функції та характеристики, як перша магнітна система та друга магнітна система, описані вище (див. Фіг. 1a, 1b, 1c і 2). Третя магнітна система 3 розташована радіально за межами, відносно осі А, області 206 утримання плазми.

Крім того, третя магнітна система 3 може, як показано, бути розташована радіально назовні, відносно осі А, першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2.

Третя магнітна система 3 має щонайменше одну круглопетльову котушку, наприклад, як показано, першу котушку 31, розташовану з того самого боку від площини симетрії Р, що й перша магнітна система, і другу круглопетльову котушку 32, розташовану на протилежній стороні площини симетрії Р, причому, друга котушка 32 розташована дзеркально симетрично відносно першої котушки 31. Зокрема, з посиланням на Фіг. 3b, кожна з першої котушки 31 і другої котушки 32 має струм, який тече, коли магнітна система працює, у напрямку до площини поперечного перерізу (позначено хрестиком) зліва на Фіг. 3b та поза площини поперечного перерізу (позначено крапкою) справа на Фіг. 3c, тобто за годинниковою стрілкою, якщо дивитися зверху першої магнітної системи.

Отримані моделюванням лінії магнітного поля показані на Фіг. 4a і 4b. Конфігурація магнітного поля подібна до конфігурації на Фіг. 2. Зокрема, утворена кільцева область 206

утримання плазми, як описано вище у поєднанні з Фіг. 1a, 1b, 1c і 2. На Фіг. 4b показано квадрант фігури 4a крупним планом. Завдяки властивостям симетрії магнітних систем, властивостей магнітного поля такого квадрант достатньо для опису конфігурації поля в цілому, тобто завдяки дзеркальній симетрії відносно площини симетрії Р і обертальній симетрії навколо осі А.

На Фіг. 11 показана ще одна конфігурація, яку може мати пристрій для утримання плазми. На додаток до першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2 на Фіг. 10, так само, як на Фіг. 3a і 3b, третя магнітна система 3 розташована радіально поза областю 206 утримання плазми. Третя магнітна система має круглопетльову котушка 31.

Ще, з посиланням на Фіг. 11, так само, як обговорювалося вище разом з Фіг. 9, конфігурація поля, що відображає область 1602 відносно низької щільності магнітного потоку поблизу площини Р симетрії та область 1604 з відносно високою щільністю магнітного потоку поблизу котушок 11, 12, створює область 206 утримання заряджених частинок на основі принципу магнітного віддзеркалення.

Більше того, як і раніше з посиланням на Фіг. 11, як і на Фіг. 10, якщо дивитися радіально ззовні області 206 утримання, тобто справа на Фіг. 9, область 1602 поблизу площини симетрії відображає увігнуті лінії магнітного поля, як видно ззовні області 206 утримання плазми, а область 1604 відображає опуклі лінії магнітного поля, знову ж таки, як видно ззовні області 206 утримання плазми. Однак область увігнутих ліній магнітного поля більша, ніж у конфігурації на Фіг. 10, що відповідає більшості площі утримання плазми.

Крім того, з посиланням на Фіг. 11, як і на Фіг. 10, відповідний вибір геометрії котушок і струмів, що по них пропускають, дозволяє значно збільшити щільність магнітного потоку в області 1604 відносно високої щільності магнітного потоку біля котушок 11, 12, що забезпечує високий коефіцієнт дзеркальності.

Крім того, як видно з Фіг. 11 (та Фіг. 4a і 4b), відповідним вибором струму по котушці 31 третьої магнітної системи можна досягти конфігурації поля з радіально строго зростаючою щільністю магнітного потоку в області 206 утримання плазми.

На Фіг. 12 показано ще одну конфігурацію, яку може мати пристрій утримання плазми. На додаток до конфігурації, показаної на Фіг. 11, кожна з відповідних котушок у першій магнітній системі 1 і другій магнітній системі 2 вбудована у відповідну екрануючу феромагнітну структуру. Це фокусує магнітне поле, що забезпечує вищий коефіцієнт дзеркальності.

На Фіг. 13 показано ще одну конфігурацію, яку може мати пристрій утримання плазми. У цьому прикладі конфігурації, порівняно з конфігурацією на Фіг. 12, котушки 11, 12, 31 мають конічні та/або опуклі поверхні. Таким чином, як видно з Фіг. 13, досягається конфігурація магнітного поля, коли радіальний зовнішній периметр 1202 області 260 утримання плазми, аж до точки віддзеркальності, має увігнуті лінії магнітного поля, а також радіальний внутрішній периметр 1204, хоча щільність магнітного потоку радіально строго зростає.

На кожній з Фіг. 5a і 5b показано пристрої 500 для утримання плазми, кожен з яких має першу 1 і другу 2 магнітні системи, як описано вище у поєднанні з Фіг. 1a, 1b, 1c і 2, і додаткову третю магнітну систему 3, як детально описано вище у поєднанні з Фіг. 3a, 3b, 4a та 4b. Кожен такий пристрій 500 утримання плазми може застосовуватися в термоядерному реакторі.

Крім того, кожен пристрій 500 утримання плазми має плазмову ємність 208, яка добре відома в технології плазмового синтезу. Плазмова ємність, як показано, може бути розташована між першою магнітною системою 1 і другою магнітною системою 2. Крім того, плазмова ємність 208 може, як показано, бути розташована радіально всередині третьої магнітної системи 3, якщо така система присутня. Плазмова ємність 208, як показано, може бути обертально симетричною навколо осі А. Плазмова ємність 208 розташована так, що кільцеподібна, тороїдної форми, область 206 утримання плазми розташована всередині плазмової ємності 208.

Фізичні розміри пристрою 500 утримання плазми залежать від багатьох параметрів, таких як технічна щільність струму в магнітних котушках, ступінь утримання альфа-частинок, бажаний об'єм плазми, тощо. Нижче наведені типові розміри, які можуть забезпечити хороше утримання альфа-частинок і об'єм плазми приблизно 15 м³ при технічній щільності струму в магнітних системах 10 А/мм²:

Зовнішній діаметр першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2: 8 м - 16 м, зазвичай 12 м.

Висота кожної з котушок 11, 12, 21, 22: 1,5 м - 3,5 м, зазвичай 2,5 м.

Товщина сердечника 204, в який введені котушки: 0,6 м - 1,3 м, зазвичай 1,0 м.

Відстань між верхнім краєм першої магнітної системи 1 і нижнім краєм другої магнітної системи 2: 4,0 м - 8,0 м, зазвичай 6,0 м.

Зовнішній діаметр третьої магнітної системи 3: 10,0 м - 22 м, зазвичай 16,0 м.

Змінюючи струм котушки, можна змінювати конфігурацію магнітного поля для керування плазмою, обмеженою в області 206 утримання плазми. Наприклад, може бути змінений радіус області утримання плазми.

5 На Фіг. 5b показано пристрій 500 утримання плазми, який має необов'язковий, взагалі відомий, мікрохвильовий пристрій 210 для нагріву плазми, який, розташований у центрі пристрою 500 на осі A і, отже, радіально всередині області 206 утримання плазми.

Крім того, пристрій 500 утримання плазми може мати додатковий відомий пристрій 212 для введення іонного променя, що веде в ємність 208 і розташований радіально поза областю 206 утримання плазми.

10 Іонний промінь, наприклад, що містить альфа-частинки високої енергії, може бути введений за допомогою пристрою 210 введення іонного променя в область радіально за межами області 206 утримання плазми, після чого іони з іонного пучка можуть дрейфувати в напрямку меншого радіуса в область 206 утримання плазми, тим самим нагріваючи плазму, яка на наступній фазі може бути самопідтримуваною при нагріванні, тобто плазмою, що горить.

15 Альтернативно (не показано) іонний промінь, наприклад, що містить альфа-частинки високої енергії, може бути введений, за допомогою пристрою введення іонного променя, в область радіально всередину області 206 утримання плазми, після чого іонам з іонного пучка можуть бути дозволено дрейфувати до більшого радіуса в область 206 утримання плазми, тим самим нагріваючи плазму.

20 Таким чином, конструкція пристрою утримання плазми згідно з цим винаходом забезпечує доступ для нагрівальних пристроїв як у зовнішньому радіусі, так і в центрі системи.

Альтернативно, плазма може нагріватися мікрохвильовим пристроєм 210 для нагрівання плазми.

25 На Фіг. 6, 7 і 8 показані в перспективі з вирізом інші пристрої 500 утримання плазми, що мають першу 1, другу 2 і третю 3 магнітні системи, як описано вище в поєднанні з Фіг. 13. Пристрій 500 утримання плазми може застосовуватися в термоядерному реакторі.

Крім того, як показано на Фіг. 7, пристрій 500 утримання плазми може мати плазмову ємність 208, відому в технології плазмового синтезу. Як показано, плазмова ємність 208 може бути розташована радіально всередині котушок 31, 32 третьої магнітної системи 3, радіально всередині зовнішніх котушок 22, 12, відповідно, першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2, і радіально зовні та аксіально всередині внутрішніх котушок 11, 21, відповідно, першої магнітної системи 1 та другої магнітної системи 2.

Крім того, на Фіг. 7 показано феромагнітний укладальний елемент 204.

35 Нарешті, на Фіг. 8 показано, що пристрій 500 утримання плазми знаходиться в корпусі 1500.

Типові розміри можуть бути такими. Включаючи корпус 1500, пристрій 500 може мати діаметр приблизно 25 м і висоту приблизно 35 м. Внутрішній діаметр котушок третьої магнітної системи 3 може бути близько 12 м. Мінімальна відстань між внутрішніми котушками 11, 21, відповідно, першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2 може становити приблизно 11 м.

40 Далі будуть обговорюватися результати моделювання пристрою утримання плазми відповідно до даної концепції винаходу з посиланням на Фіг. 14a, 14b, 15, 16 і 17, що підтверджує здатність пристрою 500 утримання плазми утримувати іони термоядерної плазми. Утримання термоядерної плазми передбачає утримання іонів дейтерію, іонів тритію, альфа частинок і електронів магнітним полем в об'ємі плазми. Альфа частинки, одні з продуктів термоядерного синтезу дейтерію та тритію, з кінетичною енергією 3,5 MeV (близько 13 000 000 м/с) є, безумовно, найскладнішими для утримання частинками.

45 Якщо альфа-частинку можна утримати, то це сприятиме нагріванню плазми так, що плазма, що горить, самопідтримується утриманими альфа-частинками. Плазма, що горить, потребує зовнішньої енергії, але менше, ніж енергія нагрівання, вироблена в процесі синтезу. Такий нагрів забезпечують альфа частинки продукту синтезу. Таким чином, утримання альфа частинок є важливим.

Дейтерій і тритій зливаються при 12 keV (keV) або навіть нижче. Утримувати більш легкий іон при меншій енергії набагато легше, ніж важкий іон при високій енергії. Якщо альфа частинки продукту термоядерного синтезу можуть бути утримані, іони дейтерію та тритію, а також електрони, також будуть утримані в тому самому об'ємі, тобто якщо альфа частинки утримані, іони дейтерію та тритію також будуть утримані.

Було виконано моделювання траєкторій заряджених частинок у магнітному полі, обчислених методом кінцевих елементів (FEM), для перевірки можливості утримання заряджених частинок.

Оскільки система є оберально-симетричною, її можна описати двовимірним (2D) моделюванням. Крім того, оскільки існує дзеркальна симетрія між першою магнітною системою та другою магнітною системою, перший квадрант (див. Фіг. 4b, 9-13) може повністю визначати весь об'єм системи.

Траєкторії частинок розраховувалися ітераційно з урахуванням дії сили Лоренца на частинку та другого закону Ньютона.

На Фіг. 14a, 14b, 15, 16 і 17 показано результати одночасткового моделювання в конфігурації, розглянутій вище в поєднанні з Фіг. 6, 7, 8 і 13.

На Фіг. 14a показано змодельований шлях дейтрона з кінетичною енергією 100 кеВ, а на Фіг. 14b показано змодельований шлях альфа-частинки з кінетичною енергією 3,5 МеВ, тобто такий же типовий, як продукт синтезу між іоном дейтерію та іоном тритію. Обидві частинки обмежені в зоні утримання плазми, будучи магнітно відбитими у відповідних кінцевих точках. У першому наближенні для даного вектора початкової швидкості гіроцентр заряджених частинок слідуватиме заданій лінії поля та відбиватиметься в тій самій кінцевій точці незалежно від кінетичної енергії чи заряду частинки. Однак, оскільки частинки матимуть різні радіуси власного обертання гіроскопа (радіус Лармора), дрейф буде різним.

На Фіг. 15, 16 і 17 показано, відповідно, змодельовані траєкторії заряджених частинок з початковими радіальними положеннями 1,5 м, 3,0 м і 4,5 м, кожна для відношення V_z/V_R (осьова швидкість до радіальної швидкості) 0,5, 1,5, 2,5, показуючи утримання заряджених частинок для кожної з цих конфігурацій.

Концепція винаходу була в основному описана вище з посиланням на приклади варіантів здійснення. Однак, як це легко зрозуміти фахівцю в даній галузі техніки, інші варіанти здійснення, ніж ті, що описані вище, однаково можливі в межах концепції винаходу, яку визначено доданою формулою винаходу.

Нижче наведено приклади, які є частиною опису.

1. Пристрій (500) утримання плазми, що включає:

першу магнітну систему (1), що має першу множину концентрично розташованих круглопетльових котушок (11, 12) що містить:

першу котушку (11), виконану з можливістю пропускання струму в першому напрямку; і

другу котушку (12), виконану з можливістю пропускання струму у другому напрямку, протилежному першому напрямку; і

другу магнітну систему (2), що має другу множину концентрично розташованих круглопетльових котушок (21, 22), розташованих дзеркально симетрично щодо першої магнітної системи відносно площини (P) симетрії, розташованої між першою магнітною системою (1) і другою магнітною системою (2),

створюючи кільцеву зону (206), з площиною симетрії (P), утримання плазми магнітним полем, нормальним до площини (P) симетрії у згаданій площині симетрії (P).

2. Пристрій (500) за прикладом 1, в якому перша множина концентрично розташованих котушок (11, 12) сконструйована ідентично другій множині концентрично розташованих котушок (21, 22).

3. Пристрій за будь-яким із прикладів 1-2, який додатково має третю магнітну систему (3), розташовану радіально поза областю (206) утримання плазми, причому, третя магнітна система (3) має щонайменше одну круглопетльову котушку (31, 32).

4. Пристрій (500) за прикладом 3, в якому третя магнітна система (3) має першу котушку (31), розташовану з того самого боку від площини (P) симетрії, що й перша магнітна система (1), і другу котушку (32), розташовану на протилежному боці від площини симетрії (P), причому, згадана друга котушка (32) розташована дзеркально симетрично відносно першої котушки (31).

5. Пристрій (500) за будь-яким з прикладів 1-4, в якому перша множина концентрично розташованих котушок у першій магнітній системі та друга множина концентрично розташованих котушок у другій магнітній системі вбудовані у відповідні феромагнітні структури.

6. Пристрій (500) за прикладом 5, в якому феромагнітна структура не покриває щонайменше одну котушку з відповідної множини котушок у напрямку до площини симетрії.

7. Пристрій (500) за будь-яким з прикладів 5-6, у якому феромагнітна структура містить феромагнітну сталь.

8. Застосування пристрою (500) за будь-яким з прикладів 1-7 для утримання плазми.

9. Застосування пристрою (500) за будь-яким з прикладів 1-7 у термоядерному реакторі.

10. Спосіб утримання плазми, що забезпечує:

у першій магнітній системі (1), що має першу множину концентрично розташованих круглопетльових котушок (11, 12), причому, перша котушка (11) пропускає струм у першому

напрямку, а друга котушка (12) пропускає струм у другому напрямку, протилежному першому напрямку; і

у другій магнітній системі (2), що має другу множину концентрично розташованих круглопетльових котушок (21, 22), які пропускають струми дзеркально симетрично щодо першої магнітної системи (1) відносно площини симетрії (P), розташованої між першою магнітною системою (1) і другою магнітною системою (2),

створення кільцевої області (206), з площиною симетрії (P), утримання плазми магнітним полем, нормальним до площини симетрії (P).

11. Спосіб за прикладом 10, який додатково полягає в:

керуванні обмеженою плазмою регулюванням струму в третій магнітній системі (3), розташованій радіально за межами зазначеної області (206) утримання плазми.

12. Спосіб за прикладом 11, в якому зазначене керування включає зміну радіуса згаданої зони утримання плазми.

13. Спосіб за будь-яким із прикладів 10-12, який додатково полягає в:

нагріванні зазначеної плазми введенням пучка іонів у область радіально за межами зазначеної області (206) утримання плазми або радіально всередині зазначеної зони (206) утримання плазми і дозволенні іонам із зазначеного пучка іонів дрейфувати в зазначену область (206) утримання плазми.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Пристрій (2100; 2200; 3100; 3200) для утримання плазми магнітними дзеркалами, який має множину поздовжньо розташованих надпровідних котушок (2104, 2105, 2106a, 2106b), призначених створювати зону (2106) утримання плазми з незамкненими лініями магнітного поля, і цю зону (2106) утримання плазми на кожному з двох кінців обмежено відповідною дзеркальною зоною (2108) підвищеної щільності магнітного потоку відносно центральної зони (2110) зони (2106) утримання плазми, в якому надпровідну котушку (2105, 2106a, 2106b) множини надпровідних котушок розташовано поруч із дзеркальною зоною (2108), і надпровідна котушка (2105, 2106a, 2106b) має поперечний переріз у площині, що перетинає лінію (2112) магнітного поля крізь дзеркальну зону, який має видовжену форму в напрямку вздовж лінії (2112) магнітного поля, причому множина надпровідних котушок має першу магнітну систему, що має першу множину концентрично розташованих надпровідних котушок з круглих витків, яка містить:

першу надпровідну котушку (2206a), виконану з можливістю проводити струм в першому напрямку; і

другу надпровідну котушку (2206b), виконану з можливістю проводити струм у другому напрямку, протилежному першому напрямку; і

другу магнітну систему, що має другу множину концентрично розташованих котушок з круглих витків, розташованих дзеркально симетрично відносно першої магнітної системи відносно площини (P) симетрії, розташованої між першою магнітною системою та другою магнітною системою.

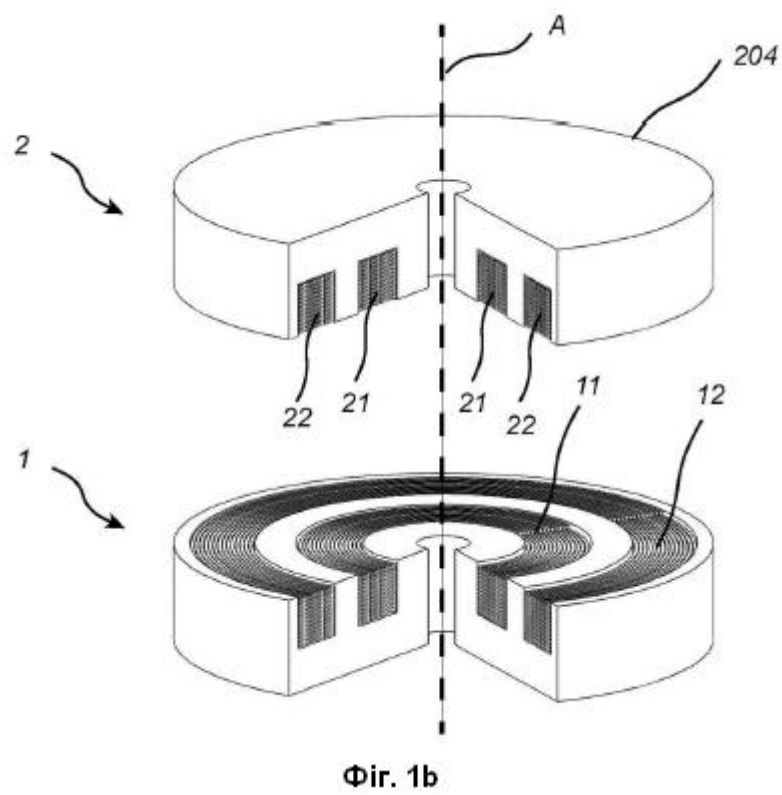
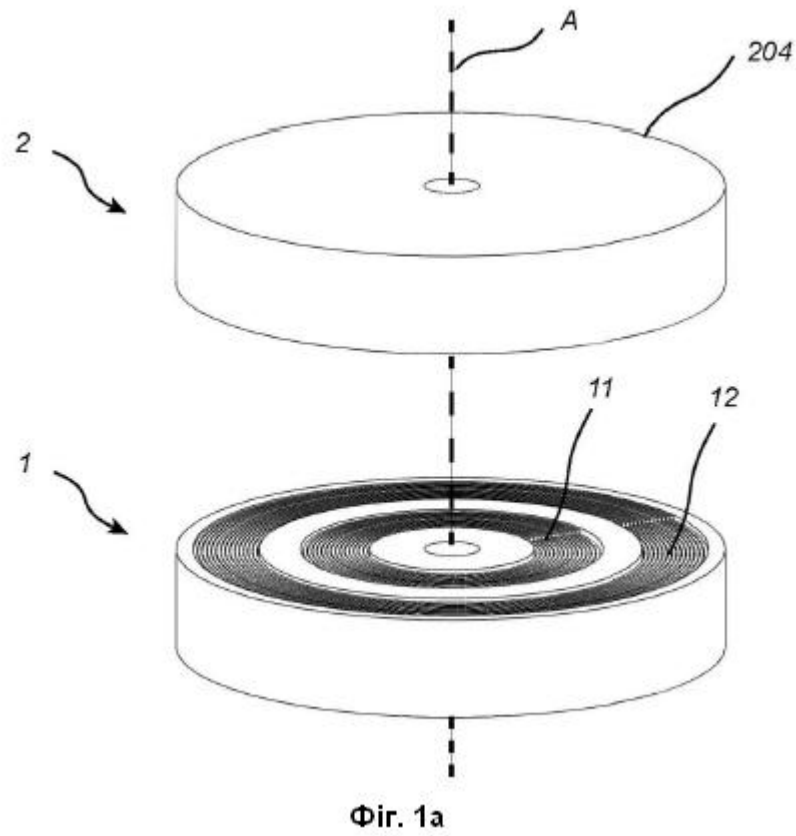
2. Пристрій за п. 1, в якому частина (2107b) периметра площі поперечного перерізу, направлена до дзеркальної зони (2108), є опуклою, якщо дивитися ззовні частини (2107b) периметра.

3. Пристрій за п. 1 або 2, в якому частина (2107a) периметра площі поперечного перерізу, направлена від дзеркальної зони (2108), є увігнутою, якщо дивитися ззовні частини (2107a) периметра.

4. Пристрій за будь-яким із пп. 1-3, в якому частина (2107b) периметра площі поперечного перерізу, направлена до дзеркальної зони (2108), простягається паралельно частині (2107a) периметра площі поперечного перерізу, направленої від дзеркальної зони (2108).

5. Пристрій за будь-яким одним з попередніх пунктів, в якому множина надпровідних котушок має третю магнітну систему (2104), розташовану радіально за межами зони утримання плазми, причому третя магнітна система має щонайменше одну надпровідну котушку з круглих витків.

6. Реактор термоядерного синтезу, який має пристрій для утримання плазми магнітними дзеркалами за будь-яким з пп. 1-5.



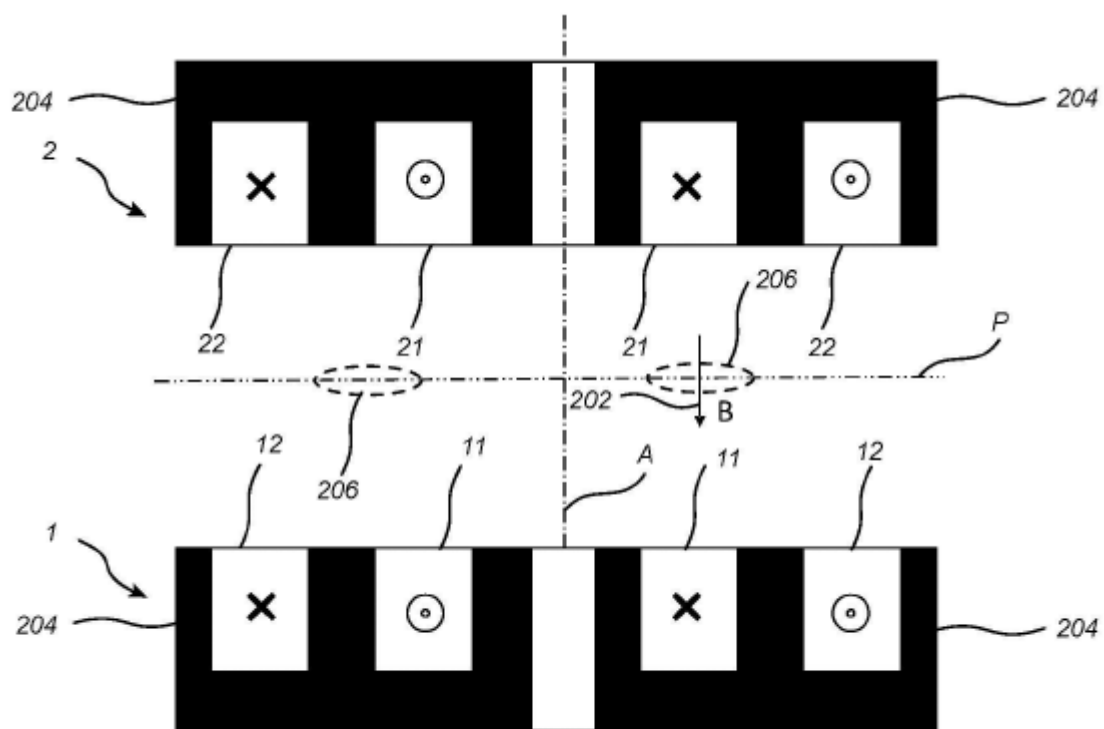


Fig. 1c

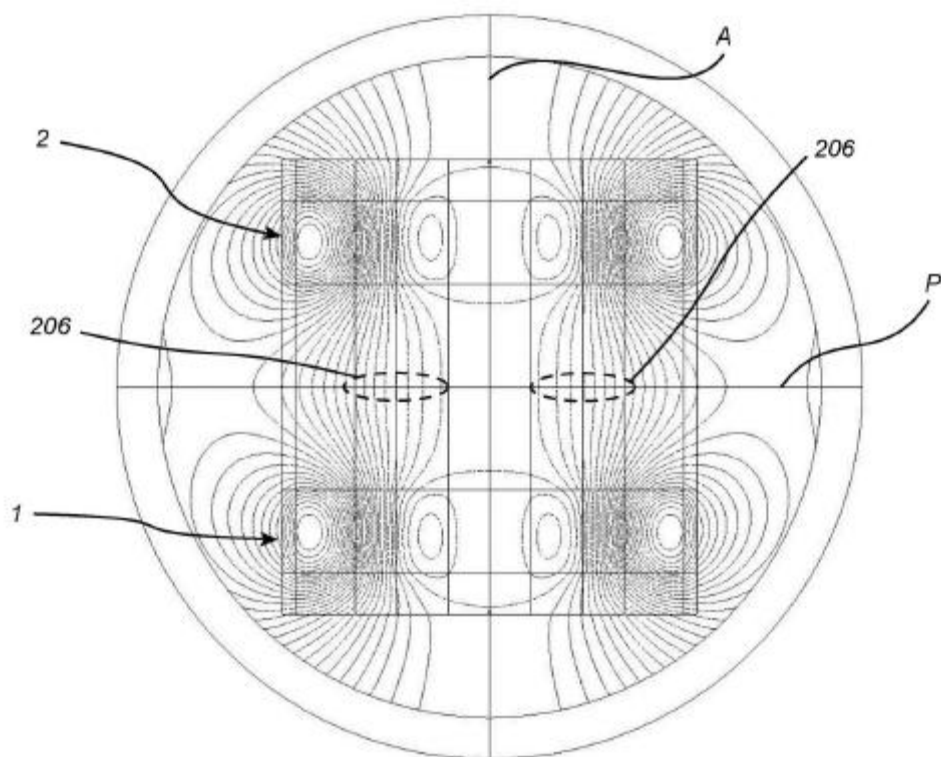


Fig. 2

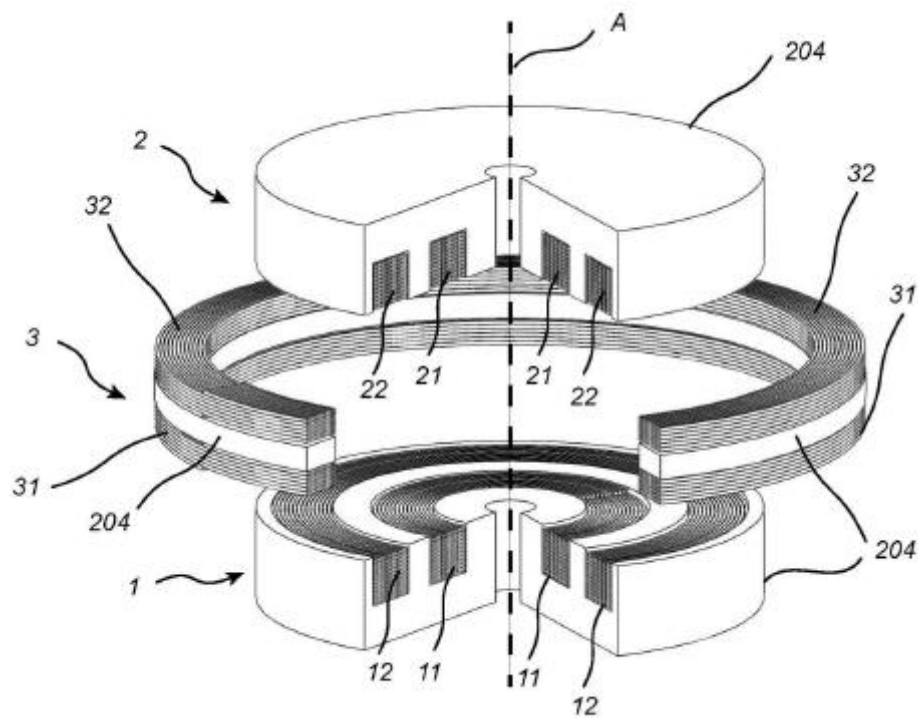


Fig. 3a

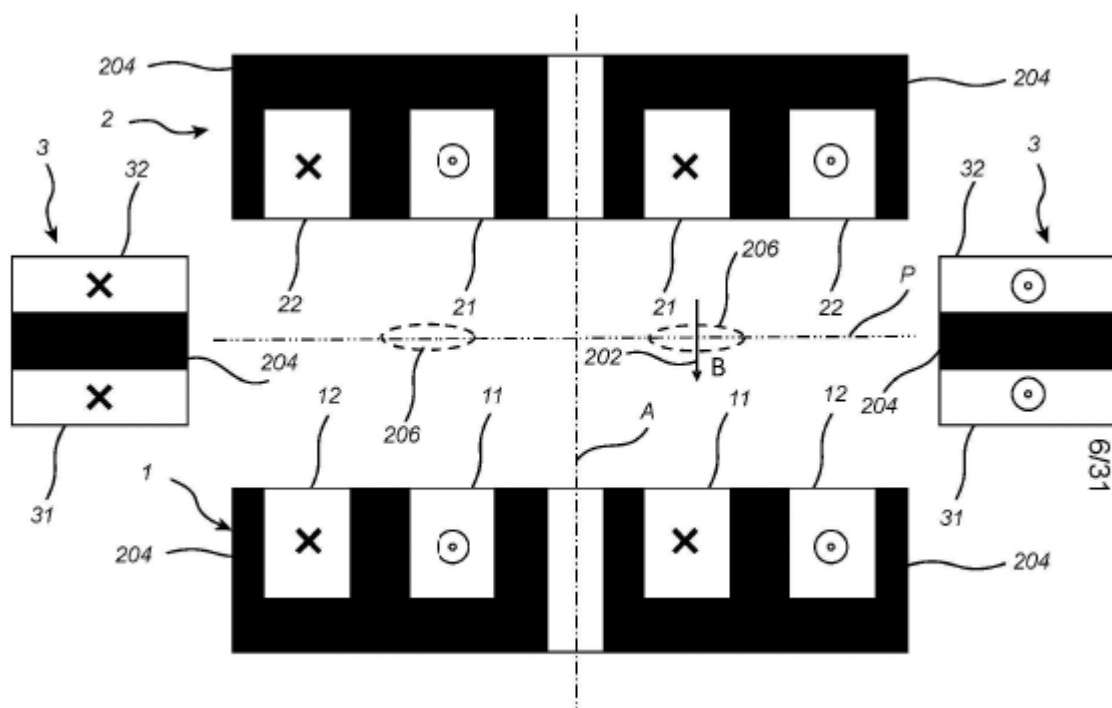


Fig. 3b

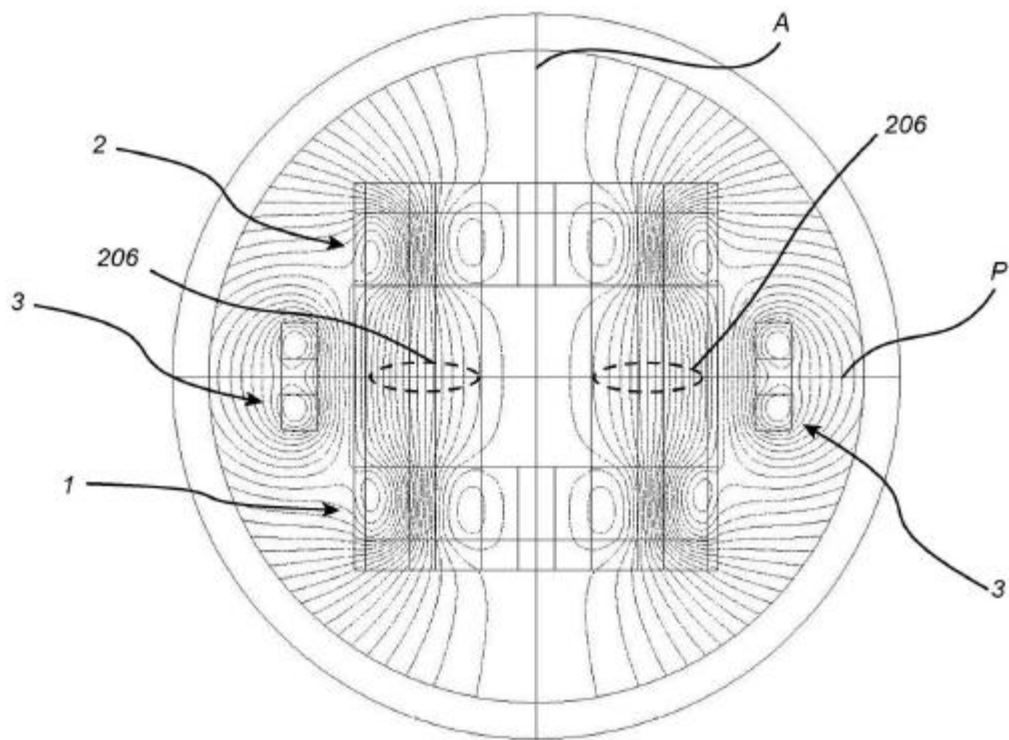


Fig. 4a

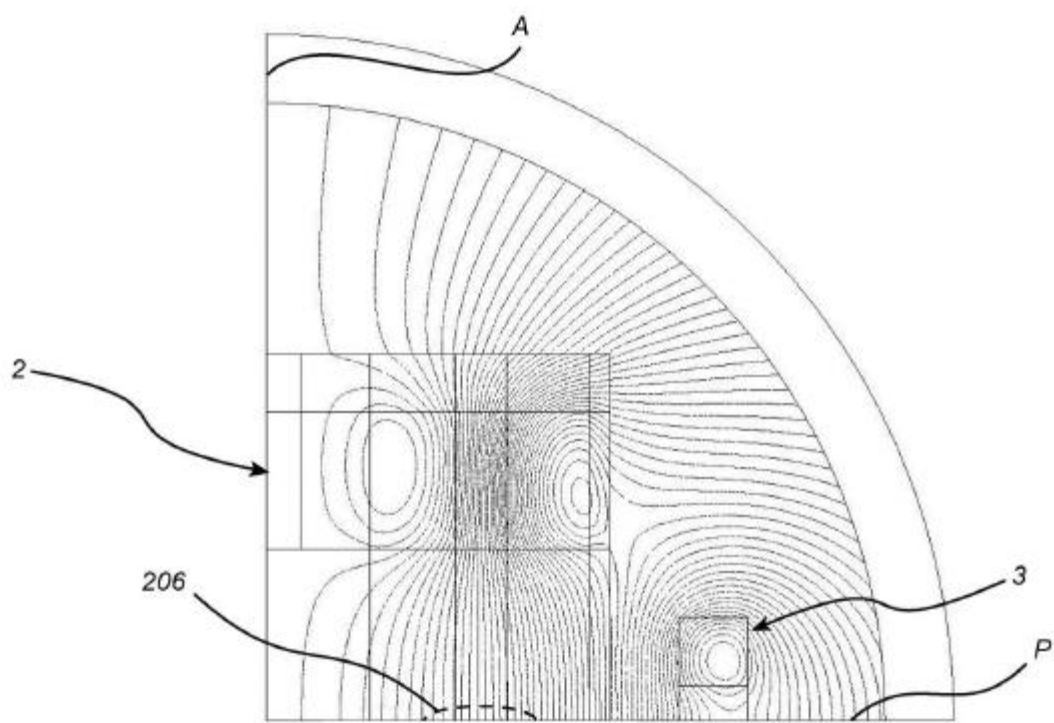


Fig. 3b

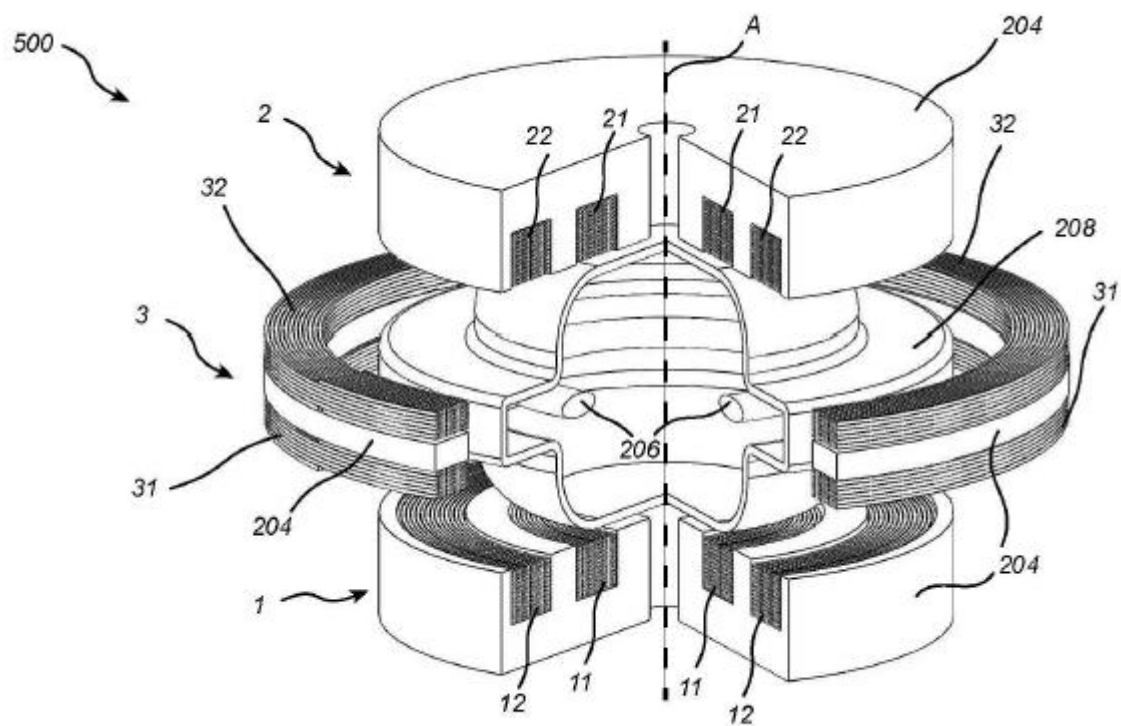


Fig. 5a

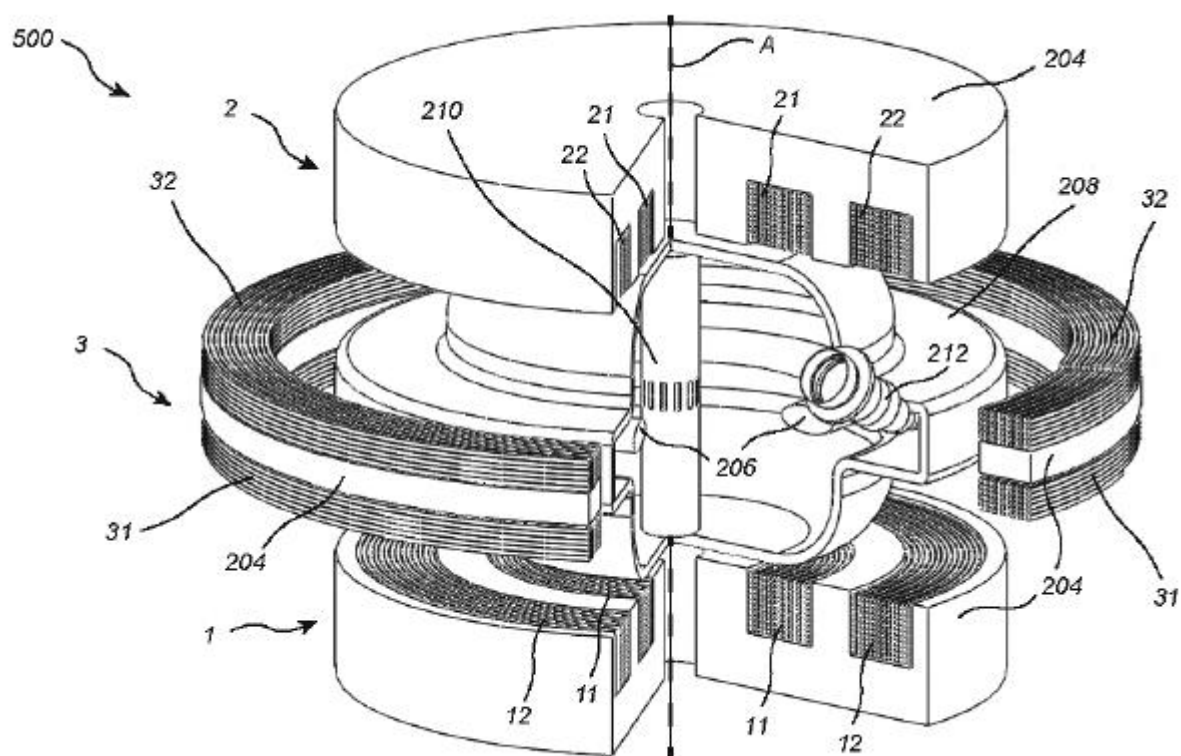


Fig. 5b

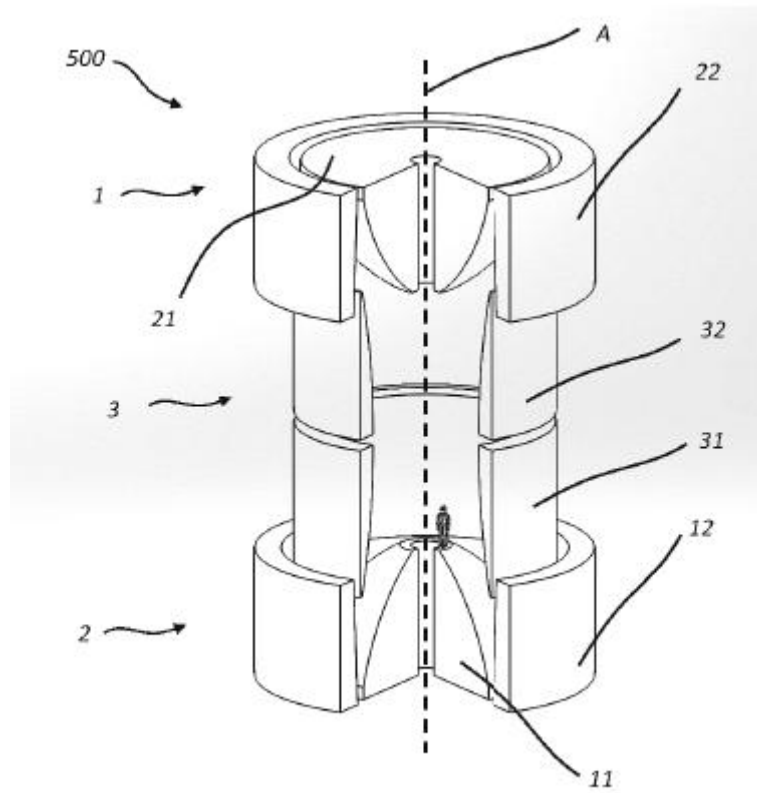


Fig. 6

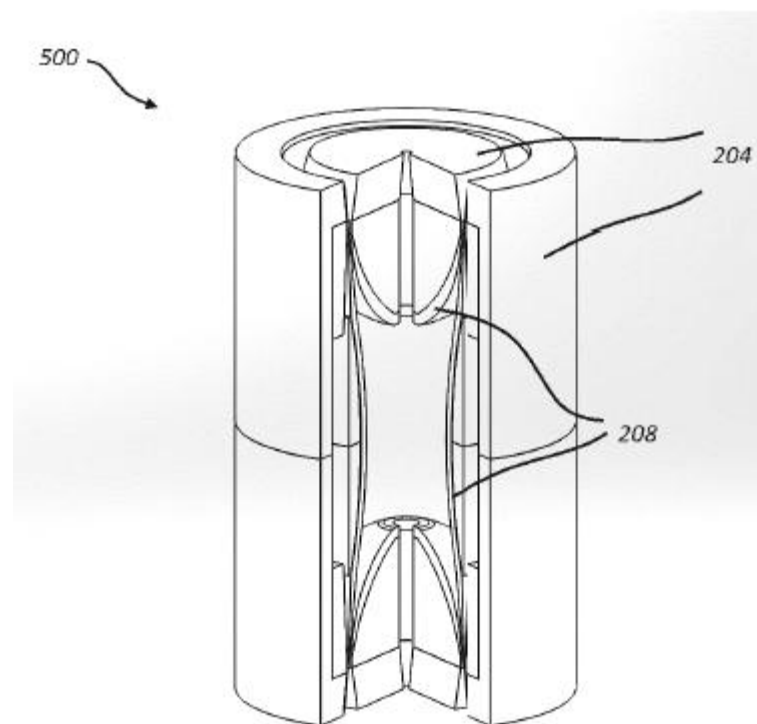


Fig. 7

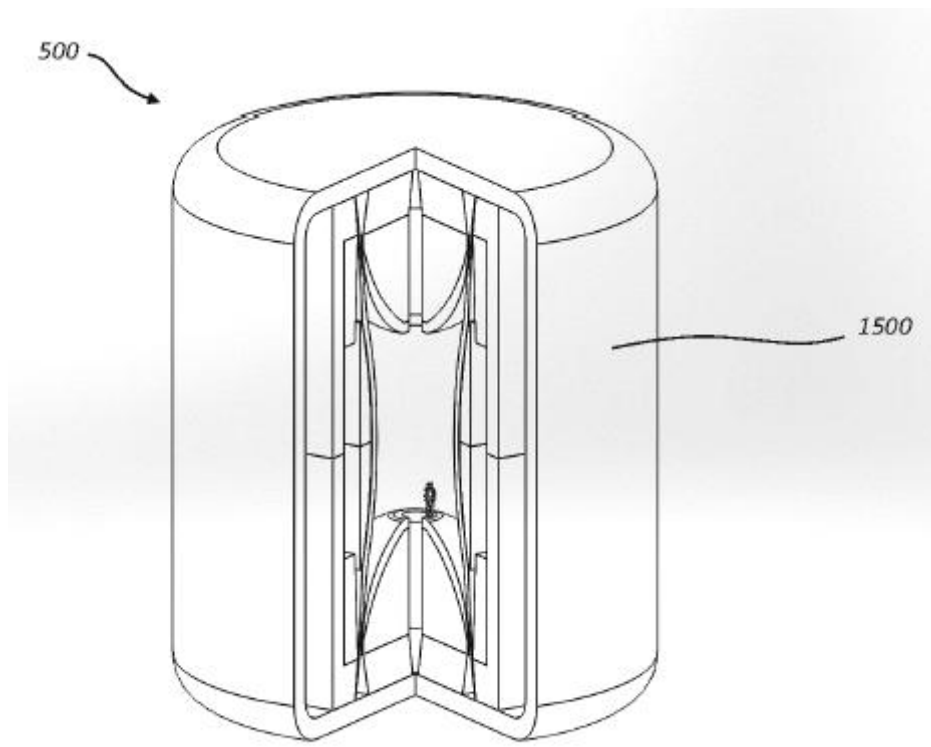


Fig. 8

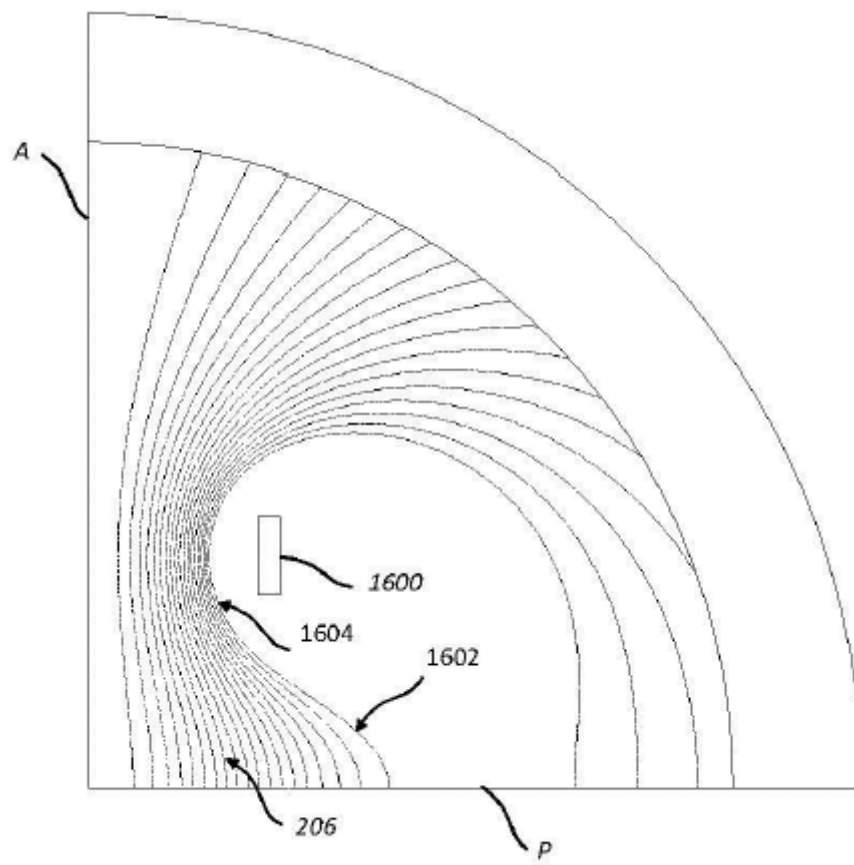


Fig. 9

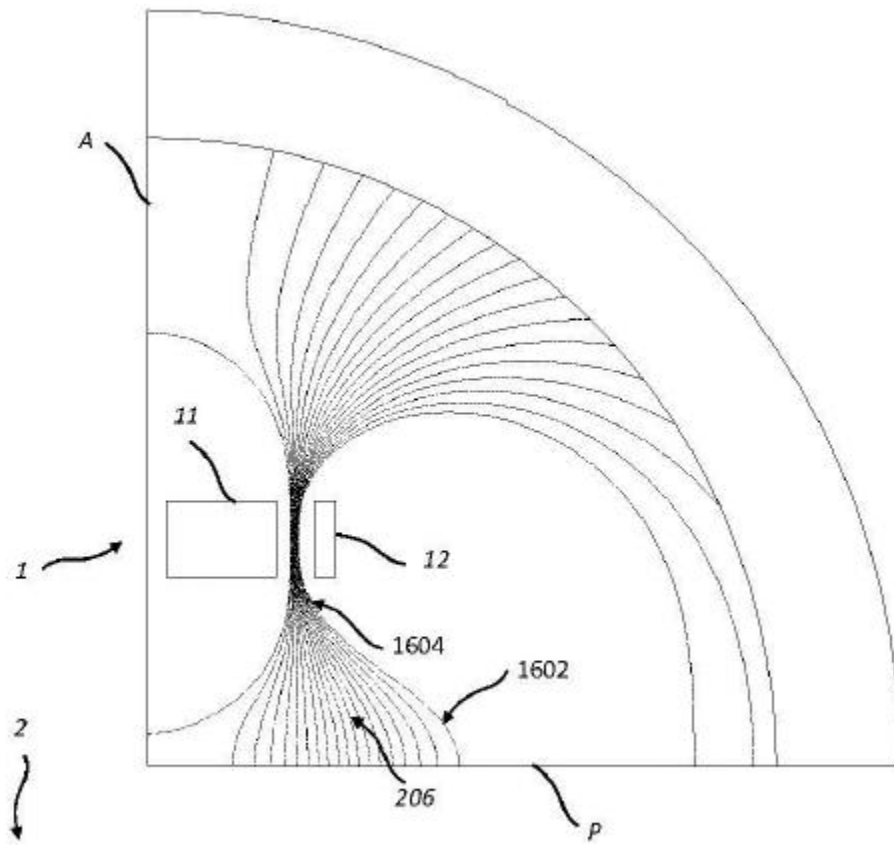


Fig. 10

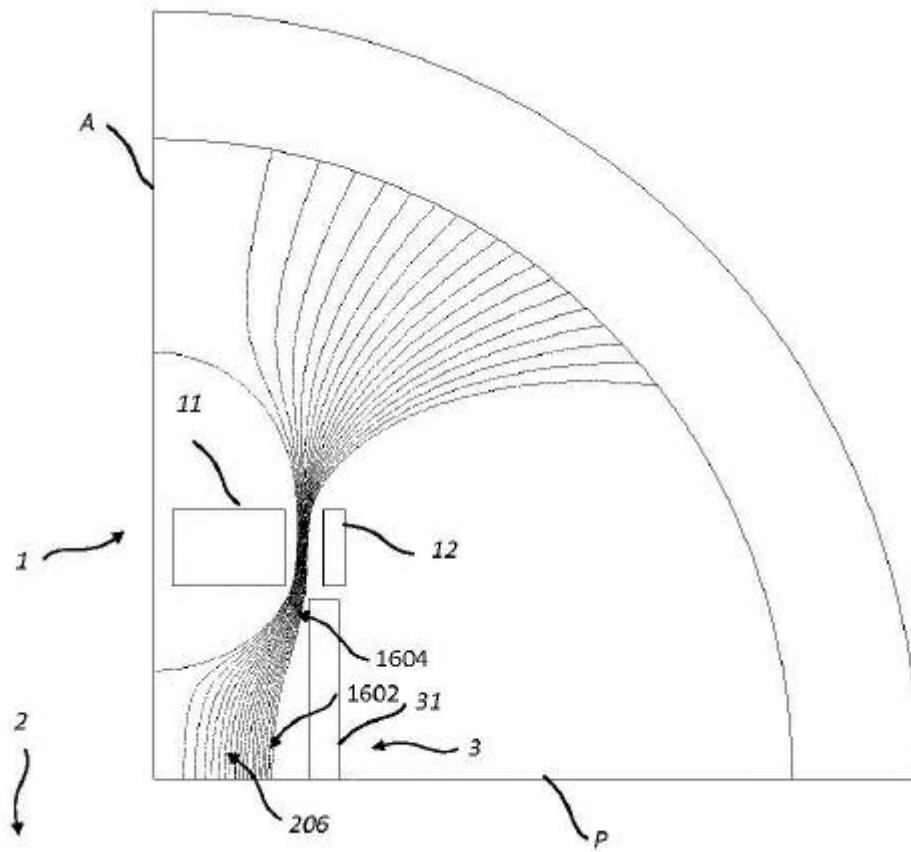


Fig. 11

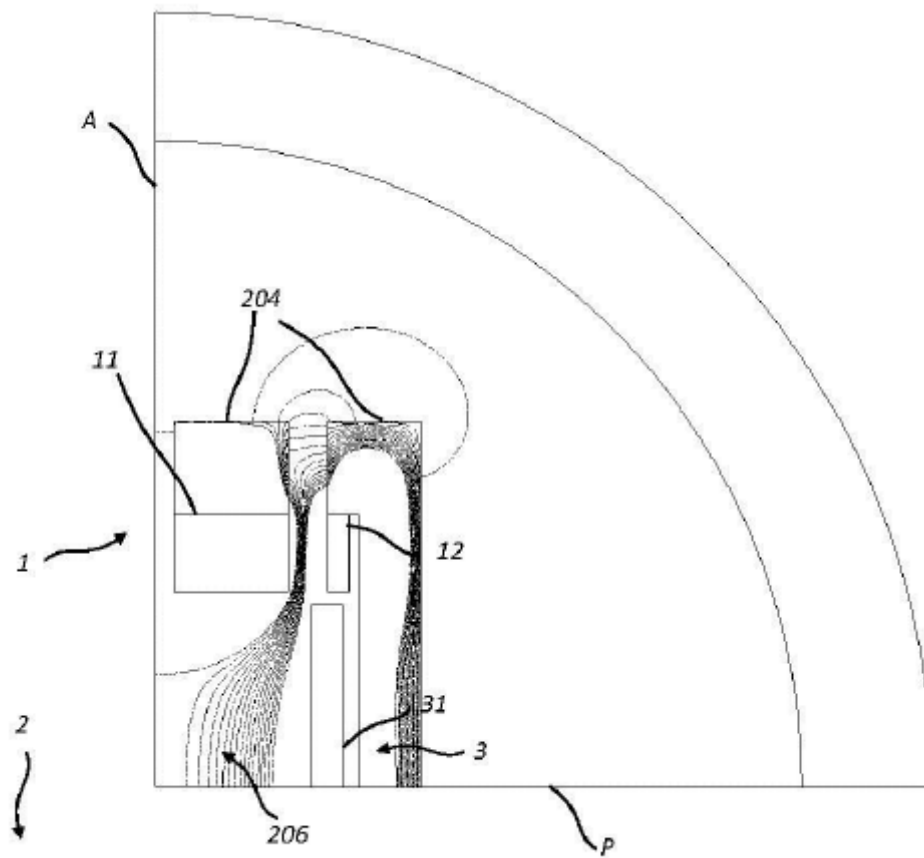


Fig. 12

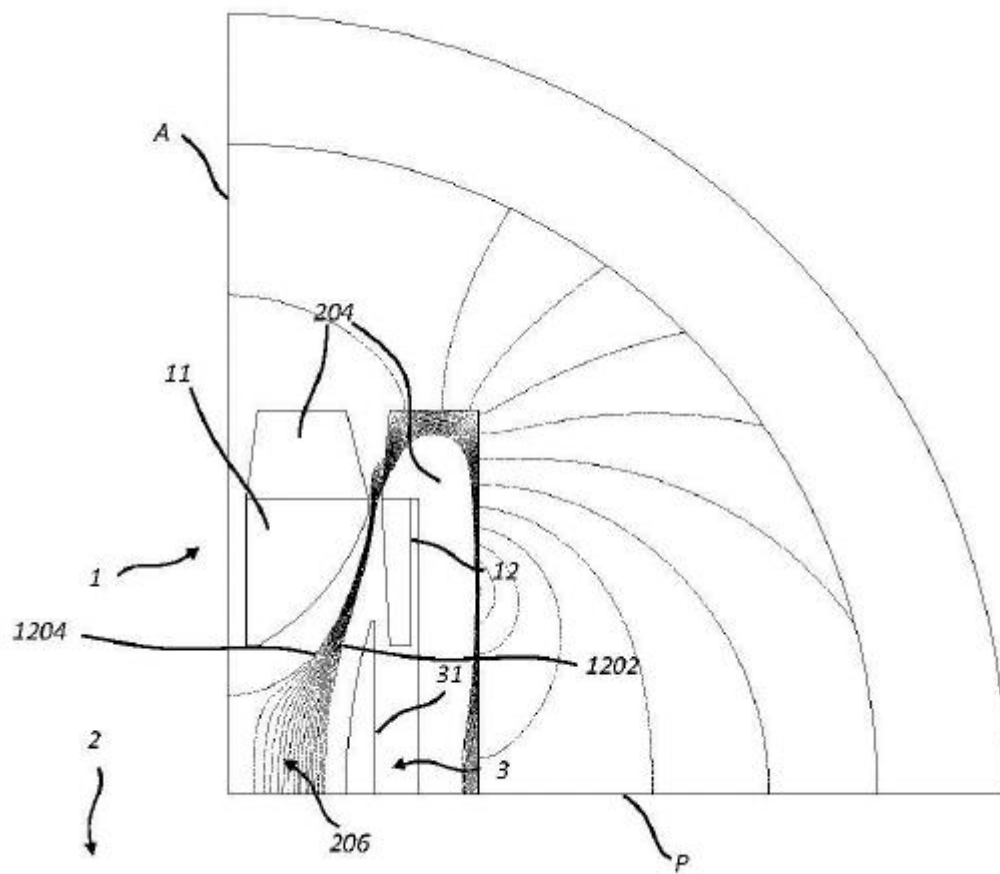


Fig. 13

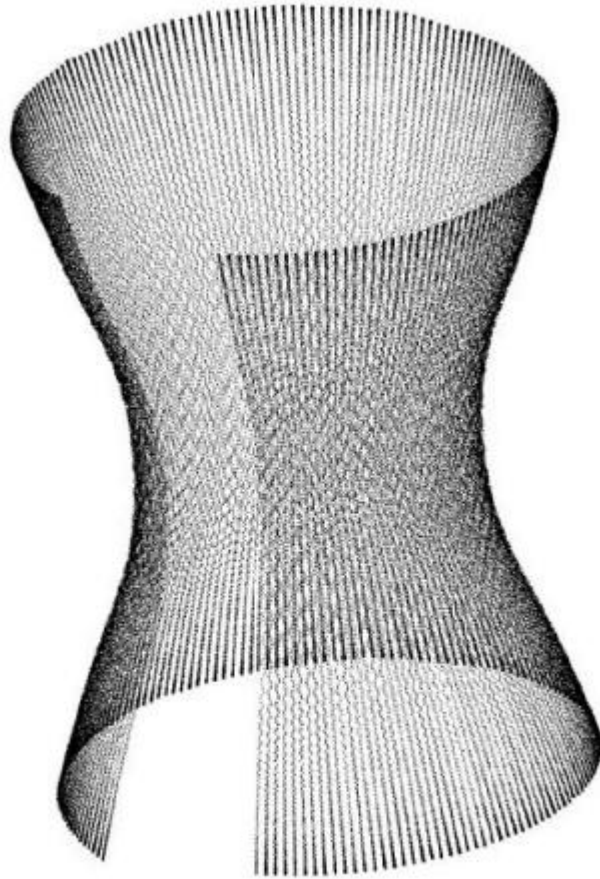
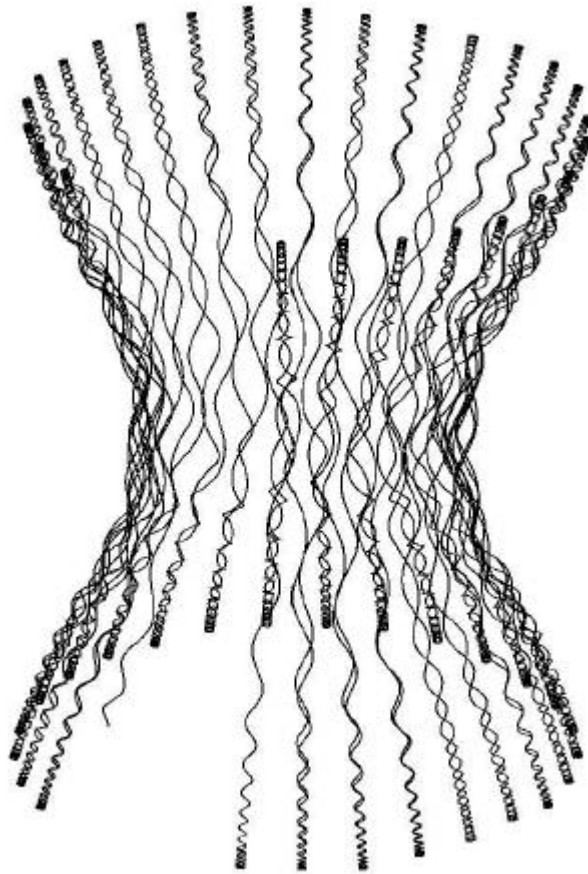
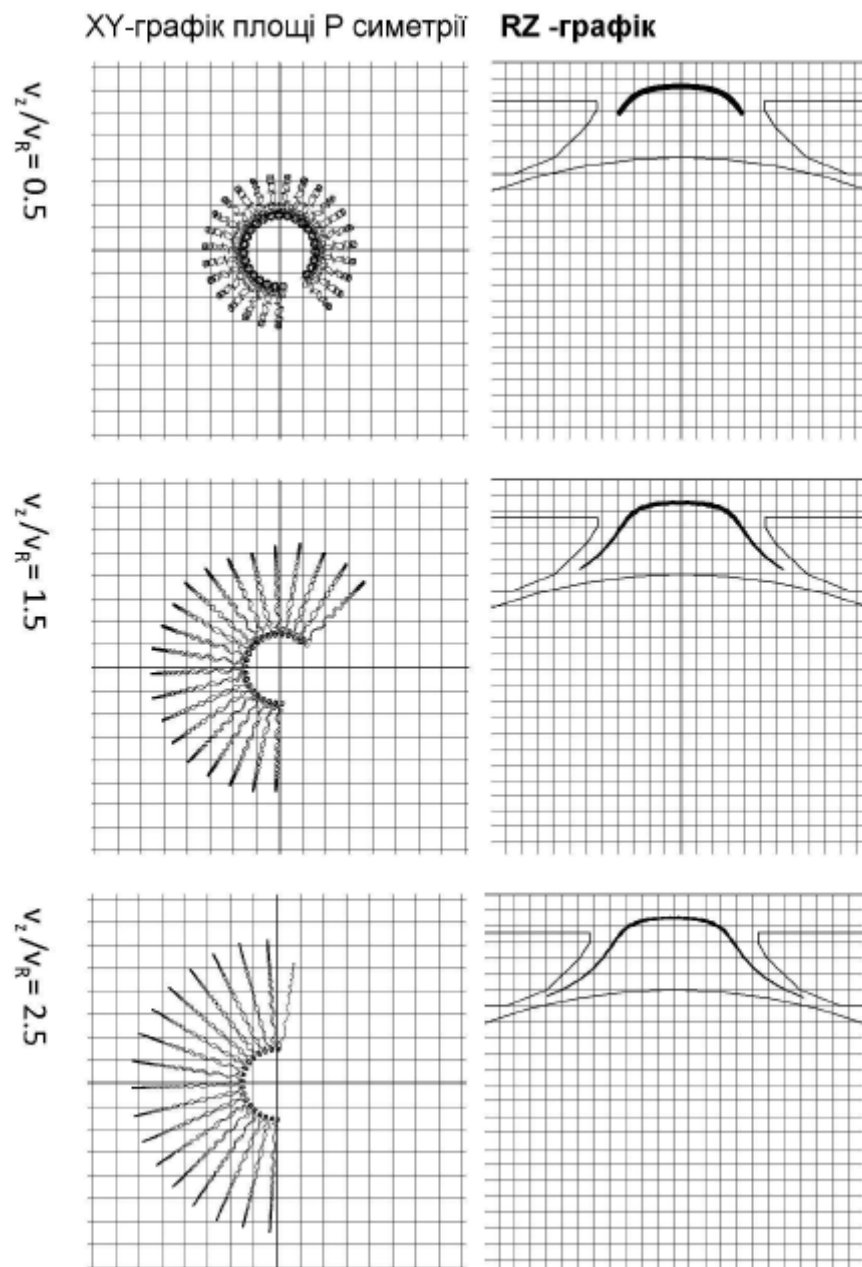


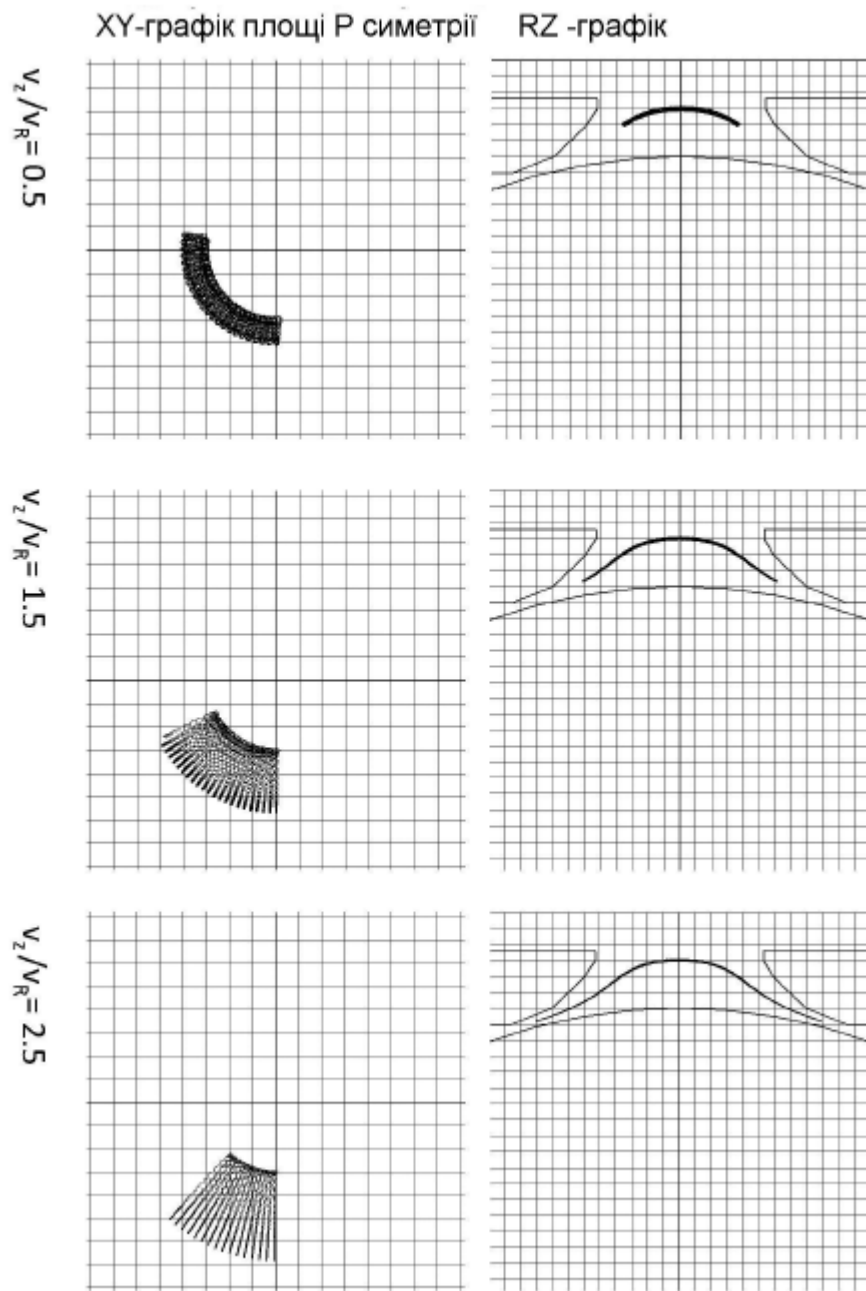
Fig. 14a



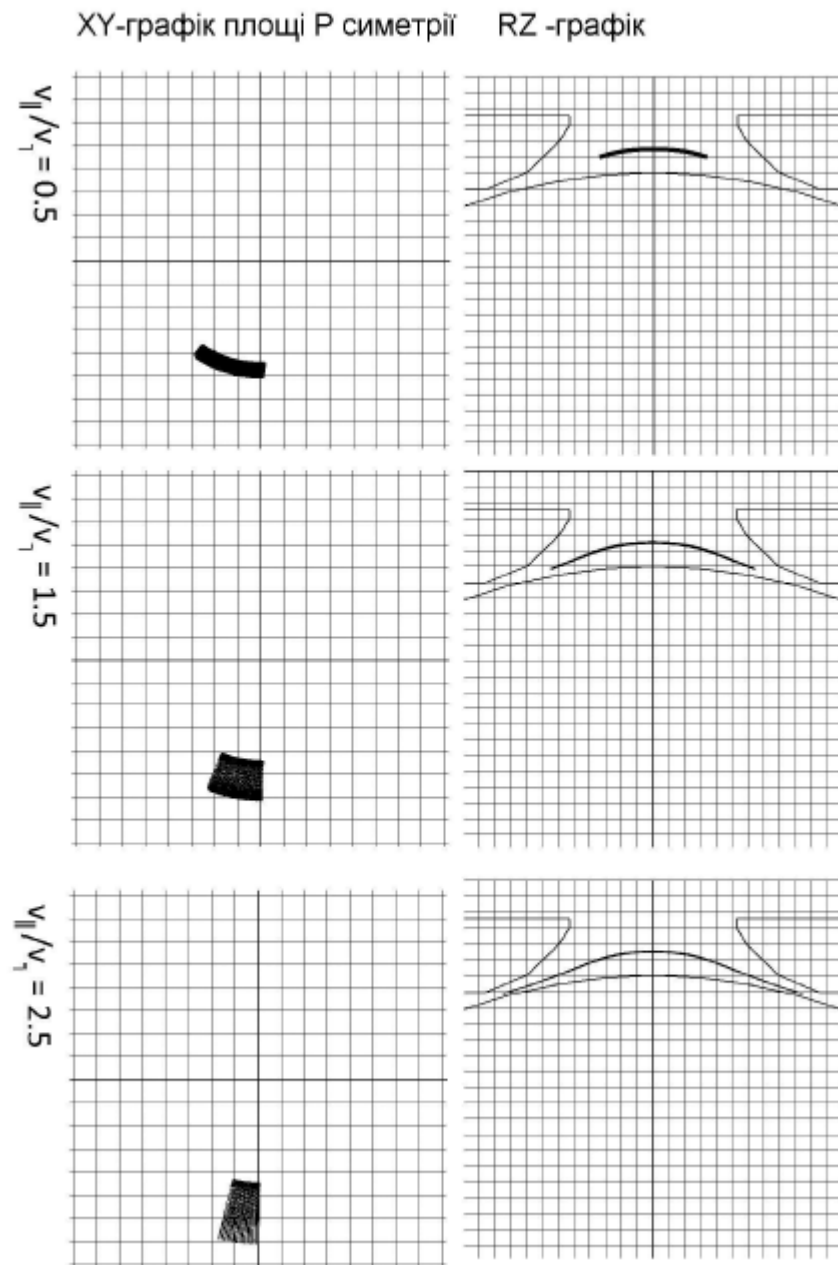
Φir. 14b



Фиг. 15



Фіг. 16



Фіг. 17

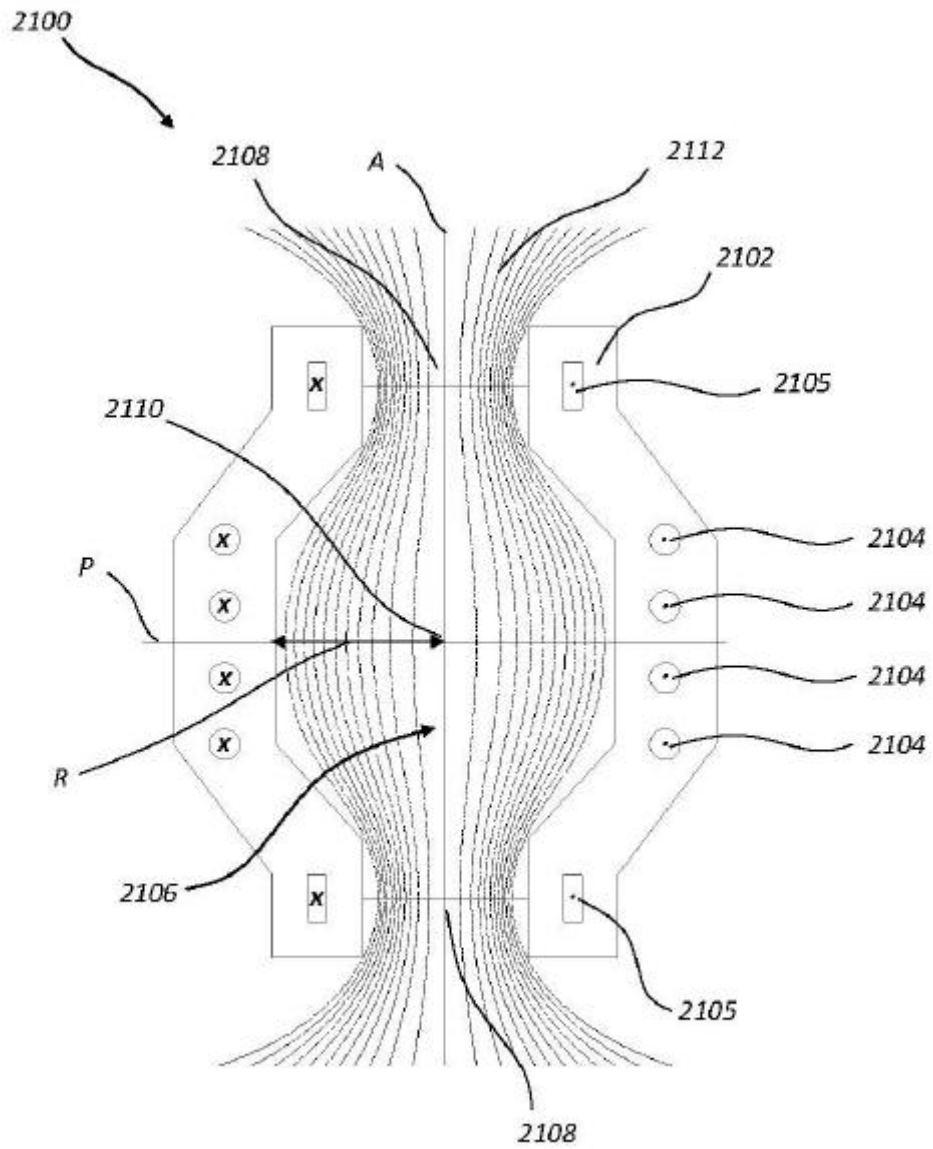


Fig. 18

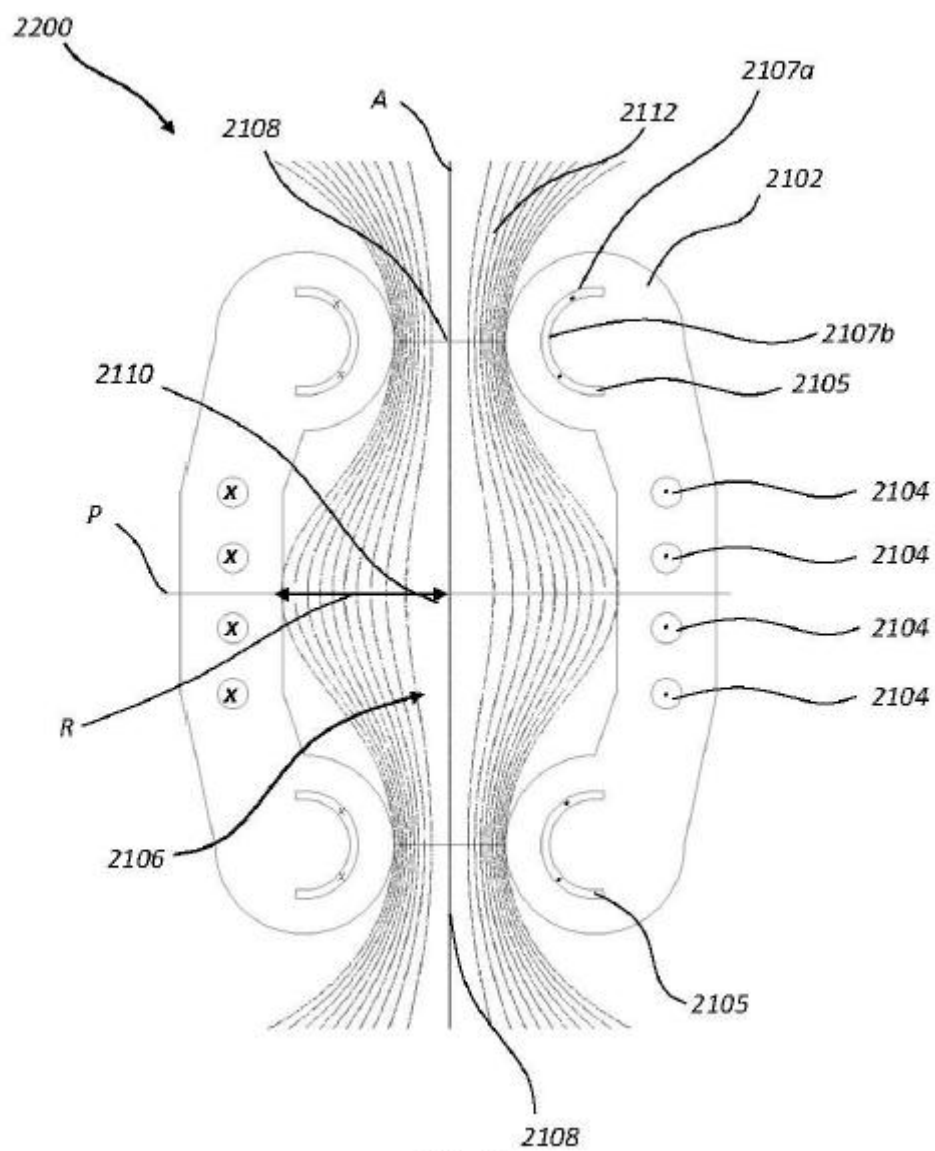


Fig. 19

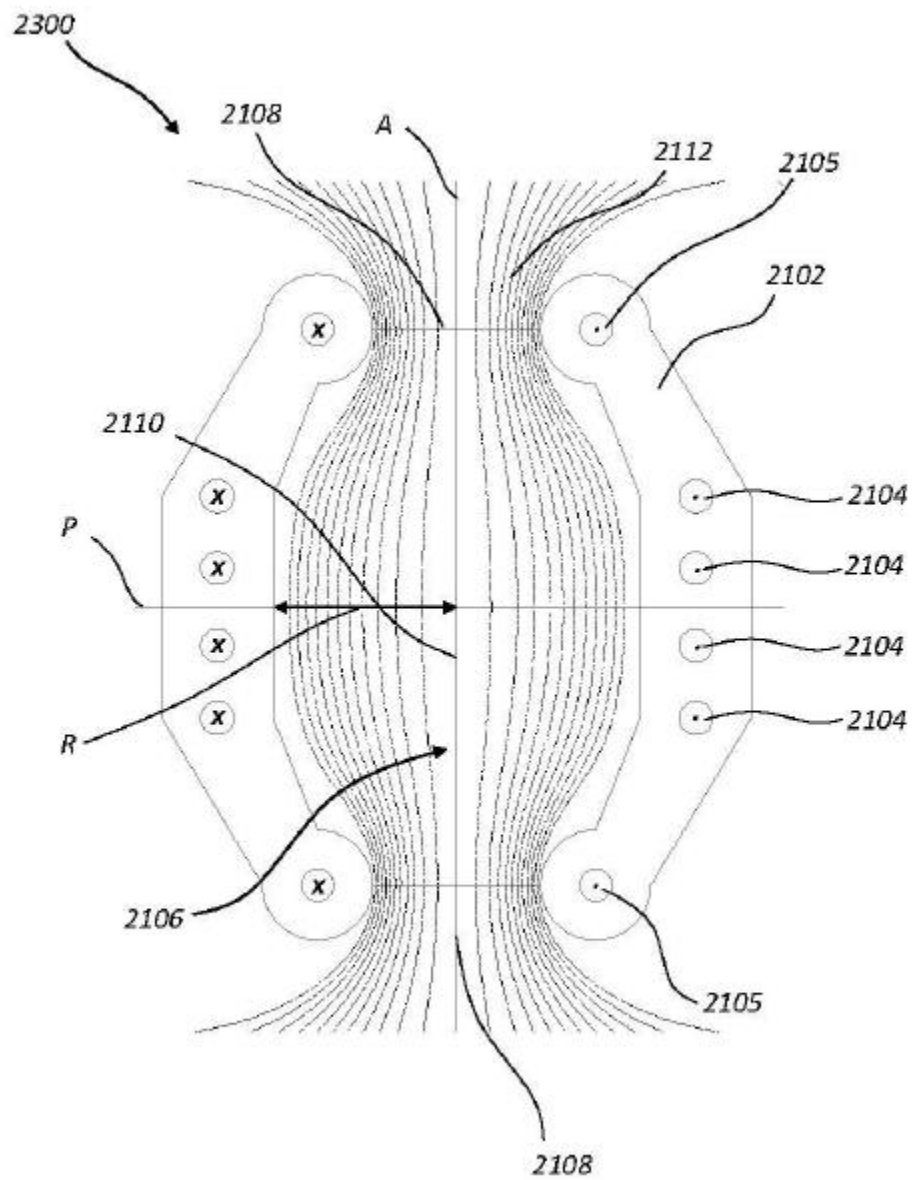


Fig. 20

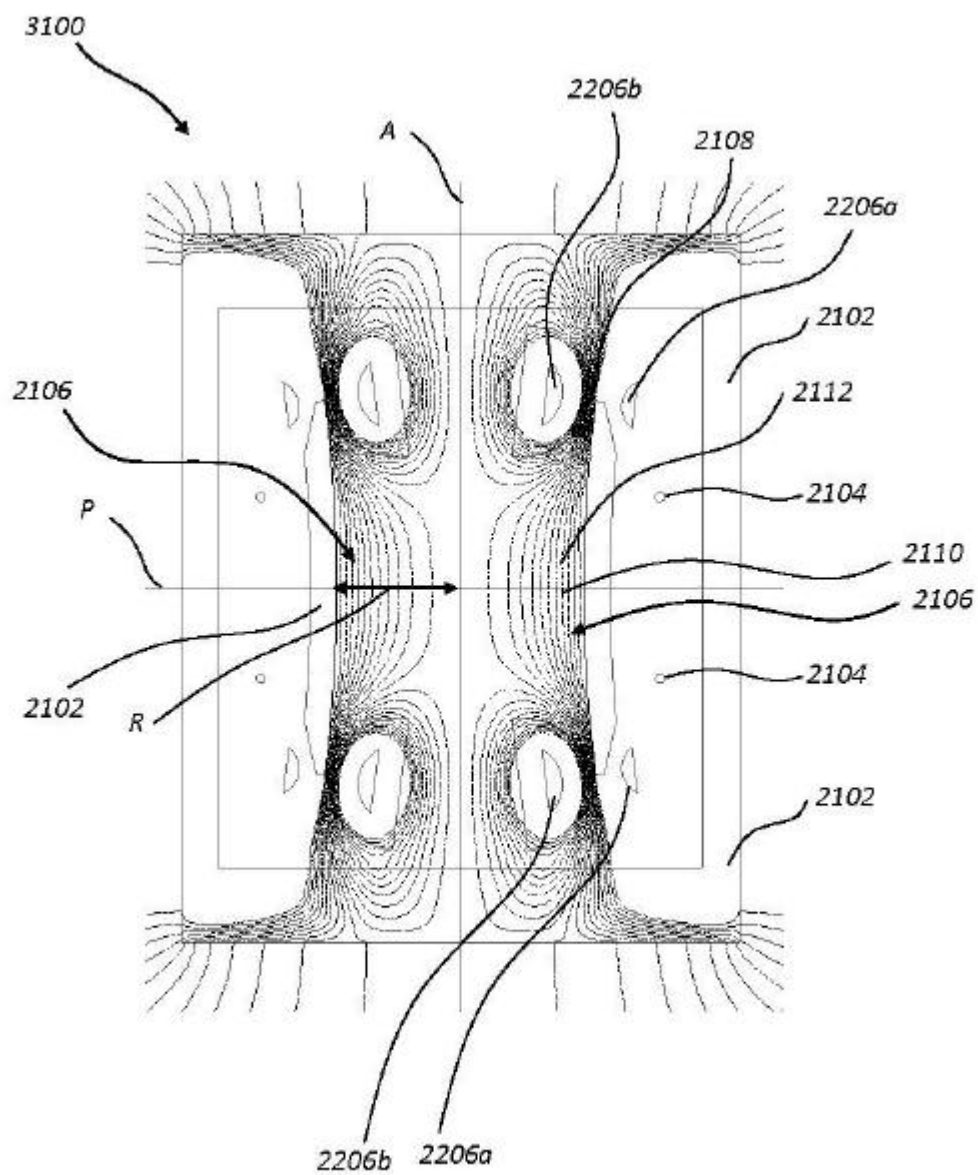


Fig. 21A

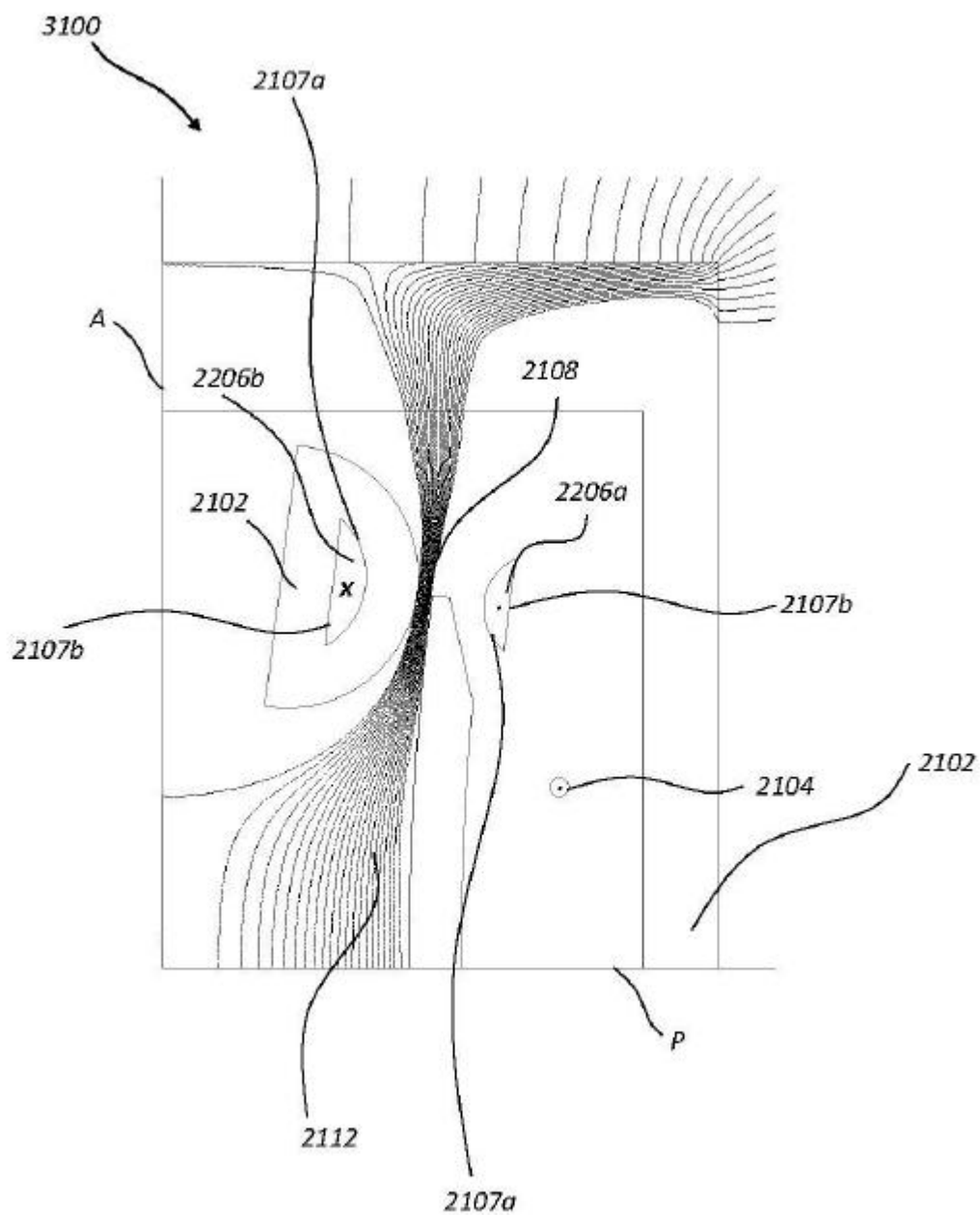


Fig. 21B

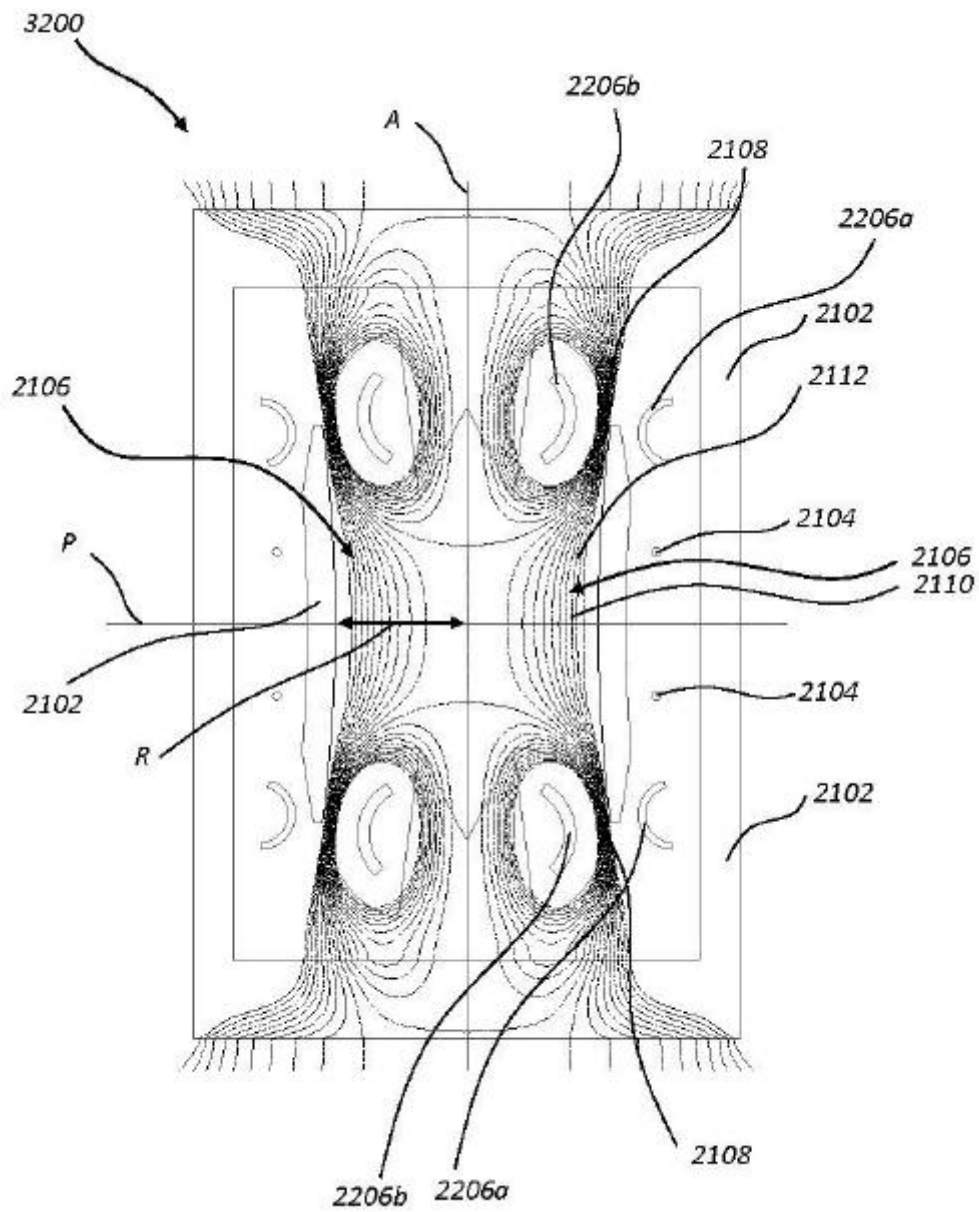
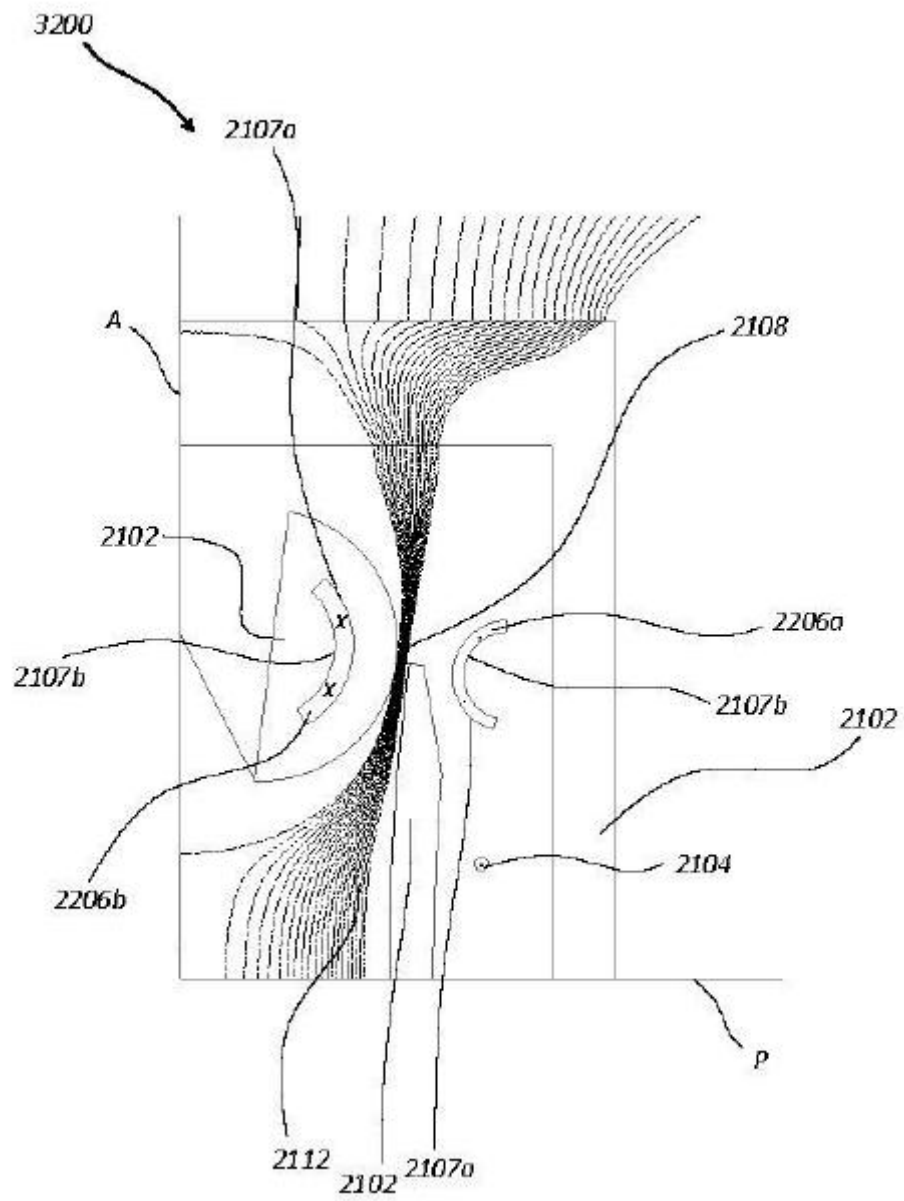
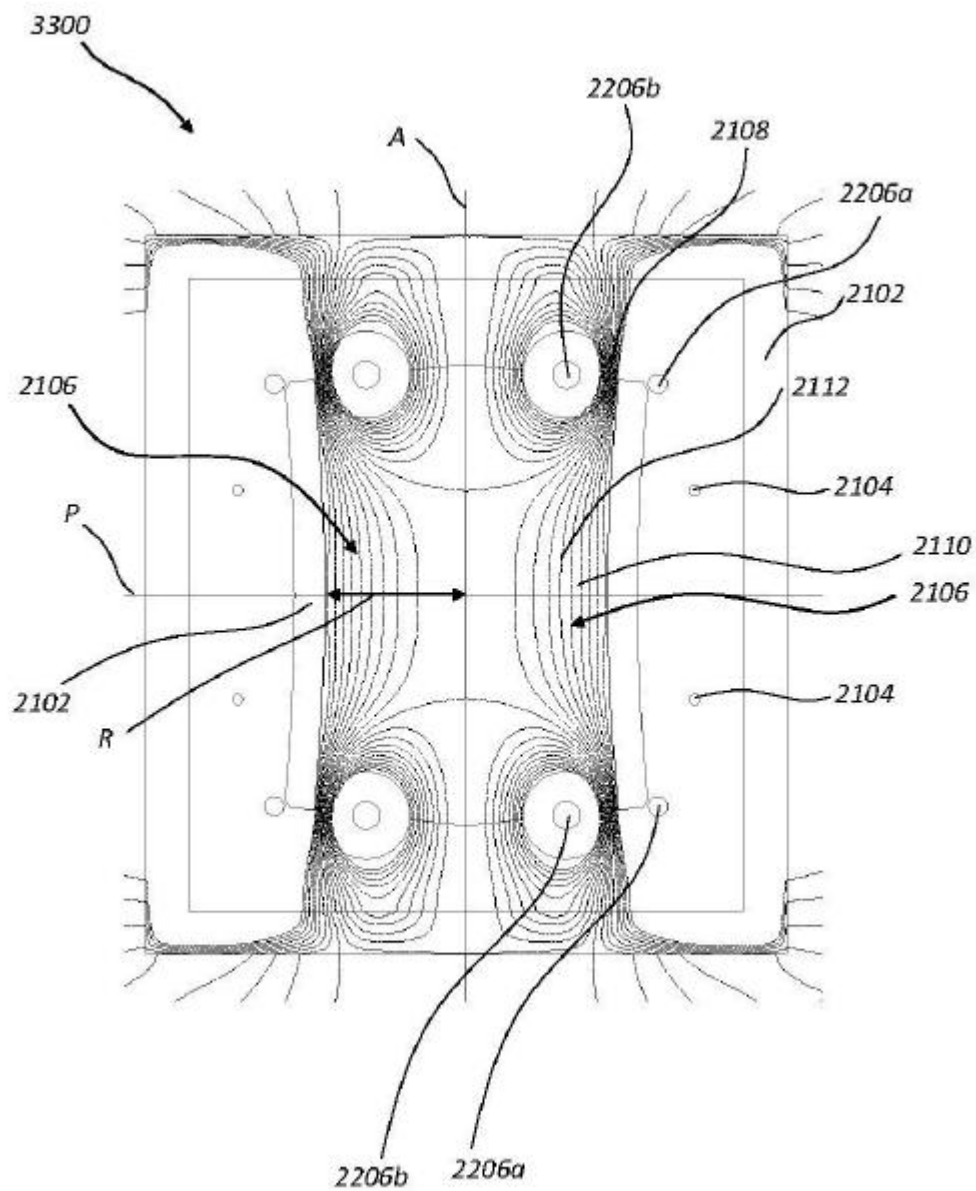


Fig. 22A



Φir. 22B



Φir. 23A

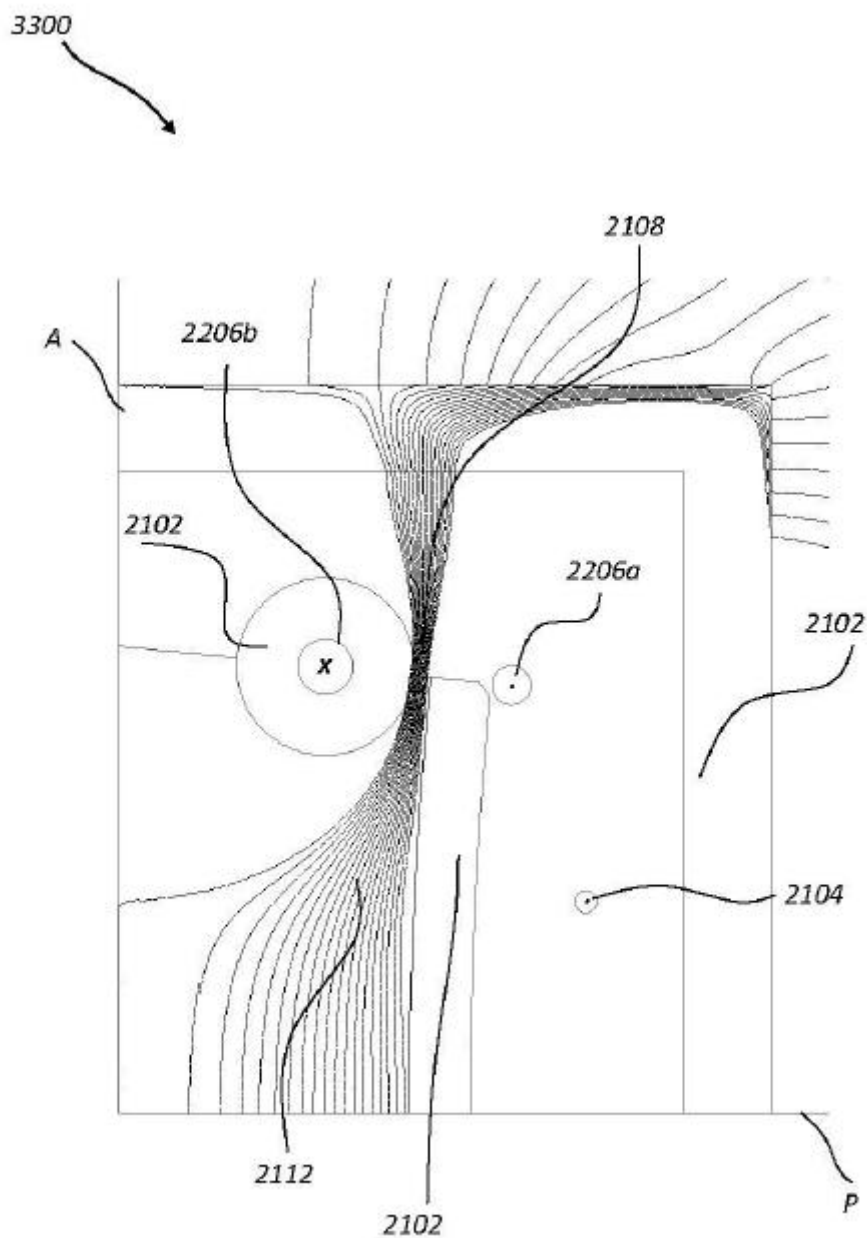


Fig. 23B