

Винахід стосується пристрою утримання плазми та способу утримання плазми.

Рівень техніки

Великі зусилля докладаються для створення реактора для керованого синтезу на землі. Найбільш перспективним є процес синтезу між водневими ізотопами дейтерію (^2H) і тритію (^3H). У процесах синтезу дейтерію-тритію створюються альфа-частинки ^4He , що має кінетичну енергію близько 3,5 MeV (мегаелектронвольт (MeV)), і нейтрон, що має кінетичну енергію близько 14,1 MeV.

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

Існує кілька різних відомих магнітних конфігурацій для утримання плазми.

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

Відомою конструкцією є магнітне дзеркало. У ньому частинки слідує за лініями магнітного поля і відбиваються в зонах збільшення щільності магнітного потоку на відповідних кінцях пристрою. Незважаючи на те, що така конструкція здатна утримувати плазму, як було продемонстровано експериментально, вона пов'язана з різними проблемами нестабільності плазми. Щоб вирішити ці проблеми, в попередньому рівні техніки були запропоновані різні закручені необертово-симетричні геометрії, наприклад, дизайн типу "Мінімальний В" ("Minimum B"), що нагадує тенісний м'яч, або "Двоконусний з точкою пересічення" ("Biconic Cusp").

Ще одна відома конструкція це токамак. У токамаку для утримання використовується тороїдне, тобто кругоподібне поле. Токамак також пов'язаний з різними проблемами стабільності плазми, такими як розділення зарядів.

Суть винаходу

Завданням цього винаходу є забезпечення вдосконаленого пристрою утримання плазми і способу утримання плазми, зокрема для використання в реакторах термоядерного синтезу.

З цією метою, згідно з першим аспектом, передбачено пристрій утримання плазми, який має першу магнітну систему, що містить першу множину концентрично розташованих кругло-замкнених кілець, що утворює першу котушку, виконану для проходження струму в першому напрямку, і другу котушку, призначена для проходження струму в другому напрямку, протилежному першому напрямку; і другу магнітну систему, що містить другу множину концентрично розташованих кругло-замкнених кілець, розташованих дзеркально симетрично до першої магнітної системи відносно площини симетрії, розташованої між першою магнітною системою і другою магнітною системою, створюючи кільцеву зону утримання плазми у площині симетрії з магнітним полем, нормальним до площини симетрії в площині симетрії.

Під поняттям кільцева зона 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 з допомогою статичних осьових і радіальних полів у магнітно-дзеркальній конфігурації з лініями у відкритому полі.

Конструкція, в якій перша котушка виконана для проходження струму в першому напрямку, а друга котушка виконана для проходження струму в протилежному, другому, напрямку, у кожній із першої магнітної системи та другої магнітної системи, дозволяє створення області високої щільності магнітного потоку між першою котушкою і другою котушкою при збереженні відносно меншої щільності потоку поблизу площини симетрії. У порівнянні зі звичайним магнітно-дзеркальним розташуванням, це дозволяє збільшити коефіцієнт дзеркальності, тим самим зменшуючи розмір конуса втрат і дозволяючи краще утримувати плазму.

Більше того, у порівнянні з токамаком, при утриманні плазми можна уникнути ефектів поділу зарядів, коли для стабільності плазми може не знадобитися індукований струм плазми. З отриманою квазістатичною плазмою, тобто без глобального плазмового струму, можна, у свою чергу, уникнути магніто-гідродинамічних нестабільностей. Крім того, термоядерному реактору можна дозволити працювати в безперервному (стабільному) стані без підвищення струму.

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

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

Пристрій може додатково містити третю магнітну систему, розташовану радіально за межами зони утримання плазми, причому третя магнітна система містить щонайменше одну котушку з кругло-замкненими кільцями.

Таким чином, можна організувати строго радіально зростаюче магнітне поле, що може бути корисним для стабільності утримання плазми, додатково покращуючи звичайне магнітне дзеркало.

Крім того, конструкція з третьою магнітною системою може дозволити організувати увігнуте магнітне поле у всій зоні утримання плазми, що може бути корисним для стабільності утриманої плазми.

Таким чином, може бути забезпечений пристрій утримання плазми з обертально-симетричними лініями відкритого поля, який має високий коефіцієнт дзеркальності та має властивості, корисні для стабільності плазми.

Крім того, третя магнітна система може дозволити керувати утриманням плазми шляхом регулювання струму в котушці з кругло-замкненими кільцями третьої магнітної системи.

Третя магнітна система може мати першу котушку, розташовану на той самій стороні площини симетрії що і перша магнітна система, і другу котушку, розташовану на протилежній стороні площини симетрії, при цьому, друга котушка розташована дзеркально-симетрично відносно першої котушки.

Кожна перша множина концентрично розташованих кілець у першій магнітній системі та друга множина концентрично розташованих кілець у другій магнітній системі можуть бути вбудовані у відповідні феромагнітні структури. Це збільшує магнітний потік через відносно високу проникність феромагнітного матеріалу, що призводить до більш сильного магнітного поля і, отже, кращого утримання для даного струму котушки.

За бажанням, зазначена феромагнітна структура не покриває щонайменше одну котушку відповідної множини кілець у напрямку до площини симетрії. Це екранує магнітний потік у напрямку від площини симетрії і направляє магнітний потік у напрямку до площини симетрії, тобто до плазми. Таким чином, для заданого струму котушки досягається більш ефективне екранування.

Зазначена феромагнітна структура може бути виконана з феромагнітної сталі.

Пристрій згідно з першим аспектом може бути використаний для утримання плазми.

Пристрій згідно з першим аспектом можна використовувати в термоядерному реакторі.

Відповідно до другого аспекту, забезпечується спосіб утримання плазми шляхом створення кільцевої зони утримання плазми в площині симетрії з магнітним полем, нормальним до площини симетрії, з допомогою першої магнітної системи, що містить першу множину концентрично розташованих кругло-замкнених кілець, що утворюють першу котушку, яка пропускає струм у першому напрямку, і другу котушку, що пропускає струм у другому напрямку, протилежному першому; і другої магнітної системи, що містить другу множину концентрично розташованих кругло-замкнених кілець, що пропускають струми дзеркально- симетрично до першої магнітної системи відносно площини симетрії, розташованої між першою магнітною системою і другою магнітною системою.

Варіанти втілення та переваги цього другого аспекту можуть бути взагалі подібними або такими ж, як у першого варіанту здійснення.

Спосіб може додатково включати керування утриманою плазмою шляхом регулювання струму в третій магнітній системі, яка розташована радіально поза зоною утримання плазми.

Керування може включати зміну радіуса зони утримання плазми, що, у свою чергу, може змінювати радіус плазми.

Спосіб може додатково включати нагрівання плазми шляхом введення іонного пучка в область радіально поза зоною утримання плазми або радіально всередині зони утримання плазми, дозволяючи іонам з іонного пучка дрейфувати в зону утримання плазми.

На відміну від існуючих рішень, таких як Токамаки або подібні пристрої, де магнітне поле, створене для утримання плазми, також відхиляє іони, що надходять ззовні від плазми, і нагрівання необхідно виконувати з допомогою нейтральних променів, які проникають крізь магнітне поле, а тільки потім іонізуються лише один раз всередині плазми – тут іони високої енергії можна зручно та просто додати до утриманої плазми або передбачити початковий нагрів плазми для створення умови термоядерного синтезу, оскільки дана конфігурація магнітного поля може втягувати іони в зону утримання плазми, а не відхиляти їх. Це може призвести до менш складної процедури та може ще більше зменшити втрати частинок.

Відповідно до третього аспекту передбачено машину на принципі магнітної дзеркальності та/або пристрій утримання частинок, що містить першу магнітну систему, що має першу множину концентрично розташованих кругло-замкнених кілець, що утворюють першу котушку, призначену для проходження струму в перший напрямок, і другу котушку, виконана з можливістю проходження струму в другому напрямку, протилежному першому напрямку; і другу магнітну систему, що має другу множину концентрично розташованих кругло-замкнених кілець, розташованих дзеркально-симетрично до першої магнітної системи відносно площини симетрії, розташованої між першою магнітною системою та другою магнітною системою, створюючи зону кільцевого утримання частинок в площині симетрії з магнітним полем, нормальним до площини симетрії в площині симетрії.

Варіанти здійснення та переваги, які обговорюються, у поєднанні з іншими аспектами, на протязі всього опису, є сумісними з цим третім аспектом.

Згідно з четвертим аспектом, пропонується спосіб утримання заряджених частинок, що включає створення кільцевої зони утримання частинок в площині симетрії з магнітним полем, нормальним до площини симетрії, за допомогою

першої магнітної системи, що містить першу множину концентрично розташованих кругло-замкнених кілець, що утворюють першу котушку, яка пропускає струм у першому напрямку, і другу котушку, яка пропускає струм у другому напрямку, протилежному першому, і другої магнітної системи, що містить другу множину концентрично розташованих кругло-замкнених кілець, що пропускають струм дзеркально-симетрично до першої магнітної системи відносно площини симетрії, розташованої між першою магнітною системою і другою магнітною системою.

Варіанти здійснення та переваги, які обговорюються у поєднанні з іншими аспектами та в усьому цьому описі, сумісні з цим третім аспектом.

Короткий опис креслень

Вищезазначені, а також додаткові об'єкти, ознаки та переваги даної винахідницької концепції будуть краще зрозумілі завдяки наведеному нижче ілюстративному та не обмежувальному детальному опису переважних варіантів здійснення з посиланням на додані креслення, де однакові номери позицій використовуються для подібних елементів, де:

Фіг. 1a - перспективний вигляд першої магнітної системи та другої магнітної системи, які можуть бути включені в пристрій утримання плазми.

Фіг. 1b - перспективний вид з вирізом першої та другої магнітних систем на Фіг. 1a.

Фіг. 1c - вид у площині поперечного перерізу першої та другої магнітних систем на Фіг. 1a та 1b.

Фіг. 2 - вид у площині, що показує змодельовані лінії магнітного поля, створені першою та другою магнітними системами на Фіг. 1a, 1b та 1c.

Фіг. 3a - вигляд у перспективі з вирізом першої магнітної системи, другої магнітної системи та третьої магнітної системи, які можуть складати основу пристрою утримання плазми.

Фіг. 3b - вид у площині поперечного перерізу першої, другої та третьої магнітних систем на Фіг. 3a.

Фіг. 4a та 4b - види у площині, що показують змодельовані лінії магнітного поля, створені першою, другою та третьою магнітними системами на Фіг. 3a та 3b.

Фіг. 5a і 5b - види в перспективі з вирізами, що показують пристрій утримання плазми.

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

Фіг. 9 - вид у площині, що показує змодельовані лінії магнітного поля, створені звичайною конфігурацією прямого магнітного дзеркала.

Фіг. 10 - вид у площині, що показує змодельовані лінії магнітного поля, створені першою та другою магнітними системами.

Фіг. 11 - вид у площині, що показує змодельовані лінії магнітного поля, створені першою, другою та третьою магнітними системами.

Фіг. 12 - вид у площині, 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 вбудовані у відповідне феромагнітне екранування.

Фіг. 13 - вид у площині, що показує змодельовані лінії магнітного поля, створені першою, другою та третьою магнітними системами.

Фіг. 14a і 14b - результати моделювання з однією частинкою в конфігурації на Фіг. 6, 7, 8 і 13.

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 співвідношень v_z/v_R 0,5, 1,5, 2,5.

Детальний опис

Як відомо, пристрої утримання плазми можуть базуватися або на лініях відкритого магнітного поля або на лініях закритого поля.

Пристрої на основі ліній закритого поля можуть, наприклад, мати тороїдальне магнітне поле. Прикладом такого пристрою є токамак.

Пристрої на основі ліній закритого поля можуть потенційно обмежувати частинки плазми без витоку, оскільки частинки будуть слідувати за лініями поля, але мають інші проблеми, такі як дрейф в схрещених полях $E \times B$ ($E \times B$ drift), викликаний поділом заряду, та магніто-гідродинамічні (МГД) ефекти, що може спричинити вихід плазми. Необхідно вжити спеціальних заходів для видалення гелієвої золи, наприклад, пульсуванням системи, що виключає сталий режим роботи.

Одна з основних проблем тороїдального поля полягає в тому, що іони не утримуються через дрейф $E \times B$, викликаний поділом заряду.

У токамаку цю проблему можна вирішити шляхом індукування струму в плазмі, де струм створить полоїдальне поле. Це призводить до того, що магнітне поле закручується вздовж тора, при цьому колоїдальне й тороїдальне поля разом утворюють скручене магнітне поле. Це пом'якшує дрейф $E \times B$, але створює додаткову проблему, оскільки плазма буде утримана тільки, поки струм у внутрішній магнітній котушці наростає, тобто неможливо працювати в усталеному стані.

Крім того, струм плазми призведе до кількох нестабільностей, пов'язаних з магніто-гідродинамічними ефектами, такими як Кинк нестабільності (Kink instabilities). Це можна вирішити з допомогою різних компенсаційних котушок навколо корпусу реактора, але основні характеристики плазми все одно будуть нестабільними через великі магніто-гідродинамічні ефекти.

Пристрої утримання плазми з лініями відкритого поля, відомі в попередньому рівні техніки, можуть працювати за принципом магнітного дзеркального відображення, при якому заряджені частинки плазми відбиваються в областях збільшення щільності магнітного потоку на відповідних кінцях зони утримання. Такі пристрої мають здатність працювати в стаціонарному режимі і, як правило, можуть мати менше проблем з поділом заряду, а також полегшують маніпулювання з попелом гелію.

Хоча визнається, що пристрої для утримання плазми з лініями відкритого поля здатні забезпечити утримання плазми, завжди буде витік частинок заряду з векторами швидкостей, які достатньо вирівняні з лініями магнітного поля. Точніше, дзеркальний ефект матиме місце для всіх частинок у діапазоні кутів наближення поза конусом втрат, що визначений кутом нахилу спіралі обертання зарядженої частинки навколо ліній магнітного поля.

Протяжність конуса втрат визначається коефіцієнтом дзеркальності r_{mirror} , який визначається як відношення між максимальною B_{max} і мінімальною B_{min} щільностями магнітного потоку, що слідує лінії магнітного поля:

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

Кут, який визначає конус втрат, визначається формулою:

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

Таким чином, можна побачити, що високий коефіцієнт дзеркальності призведе до невеликого конуса втрат, так що втечуть лише частинки, що мають швидкості, найбільш вирівняні з лініями поля. І навпаки, низький коефіцієнт дзеркальності призведе до більшого конуса втрат.

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

Друга властивість, відома з літератури, ліній магнітного поля пристрою утримання плазми, пов'язана з магніто-гідродинамічною стабільністю замкнутої плазми, це радіально строго зростаюче магнітне поле.

На Фіг. 1a, 1b і 1c показано першу магнітну систему 1 і другу магнітну систему 2, які можуть входити в пристрій утримання плазми (Фіг. 5a і 5b).

Перша магнітна система 1 містить першу множину концентрично розташованих кругло-замкнених кілець, розташованих навколо осі симетрії А, наприклад, як показано, у вигляді першої внутрішньої котушки 11 і другої зовнішньої котушки 12, розташованої концентрично до внутрішньої котушки 11 і радіально за її межами.

Крім першої магнітної системи 1 є друга магнітна система 2, що містить другу множину концентрично розташованих кругло-замкнених кілець, також концентрично розташованих навколо осі А, але вертикально зміщених відносно першої магнітної системи. Друга магнітна система може, наприклад, як показано, містити першу внутрішню котушку 21 і другу зовнішню котушку 22, розташовану концентрично до внутрішньої котушки 21 і радіально за її межами.

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

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

У цьому описі можна посилаючись на системи координат і напрямки відносно осі А і площини симетрії Р. Зокрема, координати і напрями можуть бути описані з посиланням на циліндричну систему координат або на декартову систему координат, кожна з яких має як початок перетин осі симетрії А та площини симетрії Р.

Під декартовою системою координат з координатами, які позначаються "x, y, z", "X, Y, Z", "A, B, C" або тому подібне, слід розуміти, що вона має перші дві координатні осі "x, y", "X, Y", "A, B" або подібні, що лежать у площині симетрії Р і третю координатну вісь "z", "Z", "C" або тому подібне, що простягається в позитивному напрямку вгору (як видно на Фіг. 1-5) від початку координат вздовж осі симетрії А.

Якщо одиниці для просторових координат не розкриті, то маються на увазі одиниці вимірювання чи градуси. Якщо одиниця часу не розкрита, мається на увазі одиниця секунд.

Під циліндричною системою координат слід розуміти таку, що має радіальний напрямок і координату ("R", "r" або подібні), що йдуть від початку координат на перетині осі симетрії А та площини симетрії Р, азимутальний напрямок і координата ("phi", "Phi" або тому подібне), виміряна як кут обертання навколо осі симетрії А, а також осьовий напрямок і координата ("z", "Z", "C" або тому

подібне), що простягаються в позитивному напрямку від початку координат вгору вздовж осі симетрії А. Позитивний напрямок для азимутального напрямку є відповідно до правила правої руки щодо позитивного осьового напрямку.

Крім того, у цьому описі будуть зроблені посилання на фігури 2, 4a, 4b, 9, 10, 11 та 12, що показують змодельовані лінії магнітного поля (щільності магнітного потоку), тобто лінії рівних магнітних потенціалів. Завдяки симетричним властивостям магнітних систем, розкритих тут, властивості магнітного поля такого квадранта є достатніми для опису конфігурації поля в цілому, тобто завдяки дзеркальній симетрії відносно площини симетрії Р і симетрії обертання навколо осі А. Отже, фігуру, що показує квадрант, слід інтерпретувати як розкриття конфігурації поля та магнітної системи у всіх чотирьох квадрантах, з урахуванням властивостей симетрії. Крім того, через обертovu симетрію фігури слід інтерпретувати як розкриття тривимірних магнітних полів і магнітних систем.

Перша множина концентрично розташованих кілець 11, 12 першої магнітної системи 1 може (див. Фіг. 1с), бути ідентично сконструйована з другою множиною концентрично розташованих кілець 21, 22 другої магнітної системи 2 з урахуванням дзеркальної симетрії.

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

У першій магнітній системі 1 струм внутрішньої котушки 11 є таким, що він входить у напрямку в площину поперечного перерізу (позначено хрестиком) з правого боку на Фіг. 1с і виходив з площини поперечного перерізу (позначено колом з точкою) з лівого боку Фіг. 1с, тобто проти годинникової стрілки, якщо дивитися зверху на першу магнітну систему. І навпаки, струм зовнішньої котушки 12 налаштований на те, щоб йти в напрямку від площини поперечного перерізу (позначено колом з точкою) з правого боку Фіг. 1с і в площину поперечного перерізу (позначено хрестиком) у лівий бік Фіг. 1с, тобто за годинниковою стрілкою, якщо дивитися зверху на першу магнітну систему.

Таким чином, перша множина концентрично розташованих кругло-замкнених кілець утворює першу котушку 11, налаштовану для проходження струму в першому напрямку, і другу котушку 12, налаштовану для проходження струму в другому напрямку, протилежному першому напрямку.

Аналогічно, дотримуючись дзеркальної симетрії по відношенню до площини Р симетрії, у другій магнітній системі 2 струм внутрішньої котушки 21 налаштований так, щоб протікати в напрямку в площину поперечного перерізу (позначено хрестиком) на правому боці Фіг. 1с і від площини поперечного перерізу (позначено колом з точкою) у лівому боці Фіг. 1с, тобто проти годинникової стрілки, якщо дивитися зверху на першу магнітну систему, а струм зовнішньої котушки 22 налаштований так, щоб рухатися в напрямку від площини поперечного перерізу (позначено колом з точкою) з правого боку Фіг. 1с і в площину поперечного перерізу (позначено хрестиком) у лівому боці Фіг. 1с, тобто за годинниковою стрілкою, якщо дивитися зверху на першу магнітну систему.

Таким чином, струми другої магнітної системи 2, коли працює перша магнітна система 1 і друга магнітна система 2, розташовані дзеркально симетрично до першої магнітної системи відносно площини Р симетрії, розташованої між першою магнітною системою 1 і другою магнітною системою 2.

Як показано стрілкою 202, яка вказує на вектор В магнітного поля (щільність магнітного потоку), в площині Р симетрії, дзеркально-симетрична конфігурація струмів першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2 створює, в площині Р симетрії, магнітне поле, нормальне до площини Р симетрії. В площині Р симетрії утворюється кільцева, як правило, тороїдальної форми, зона 206 утримання плазми (Фіг. 2, 5a і 5b), позначена приблизним пунктирним еліпсом, як буде пояснено далі.

Таким чином, виражаючись іншими словами, пристрій утримання плазми може містити дві дископодібні магнітні системи 1, 2, звернені одна до одної в осьовому напрямку, з проміжком між ними, де може бути утримана плазма. Кожна магнітна система 1, 2 має принаймні дві котушки 11, 12, 21, 22, де напрямок і величина струму створюють граничну умову нормальним магнітним полем в площині Р симетрії.

Крім того, ще з посиланням на Фіг. 1a, 1b і 1с, перша множина концентрично розташованих кругло-замкнених кілець 11, 12 в першій магнітній системі 1 і друга множина концентрично розташованих кругло-замкнених кілець 21, 22 у другій магнітній системі 2 можуть бути кожна вбудовані у відповідні серцевинні структури 204, які можуть бути з феромагнітного матеріалу, такого як феромагнітна сталь. В якості альтернативи, серцевинна структура 204 може бути з неферомагнітного матеріалу, такого як неферомагнітна сталь.

За бажанням, як показано, відповідні серцевинні структури 204 першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2 не покривають щонайменше одну котушку, як показано, всі кільця відповідної множини кілець у напрямку до площини симетрії Р, але покривають відповідні котушки 11, 12, 21, 22 у всіх інших напрямках.

Для порівняння, на Фіг. 9 показані змодельовані лінії магнітного поля, конфігурації прямого магнітного дзеркала, що містить дві котушки, а саме, одну котушку 1600 у кожній півкулі. Типово для такої конфігурації прямого магнітного дзеркала ("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 зону утримання 206 для

заряджених частинок, засновану на принципі магнітного відбиття, як пояснено вище. Більше того, як видно радіально за межами зони 206, тобто справа на Фіг. 9, відносно велика область поблизу площини симетрії відображена опуклими лініями магнітного поля, тоді як менша область ближче до котушки 1600 відображена увігнутими лініями магнітного поля, перші, згідно з першою властивістю, розглянутою вище, є не бажаними, а другі є бажаними. Далі можна відзначити, що в площині Р симетрії щільність магнітного потоку зменшується зі збільшенням радіусу.

Розкриті конфігурації магнітної системи робить магнітне поле нормальним до площини Р симетрії по всій площині Р симетрії, що 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 по осі А. Через обертальну симетрію першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2 конфігурація магнітного поля також є обертально-симетричною, так що 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 в або з площини поперечного перерізу на Фіг. 2, що є азимутальним напрямком, згаданим вище. Іншими словами, вектори магнітного поля лежать у площині поперечного перерізу для будь-якої такої площини поперечного перерізу по осі А. Те ж саме стосується конфігурацій на Фіг. 9–13.

На Фіг. 2 показані лінії магнітного поля, що виникають в результаті дзеркально-симетричної конфігурації струмів у першій магнітній системі 1 і другій магнітній системі 2, які обговорювалися вище з посиланням на Фіг. 1а, 1b і 1с. Результируюча конфігурація магнітного поля призводить до кільцевої зони 206 утримання, знову представленої приблизно пунктирними еліпсами, в яких можуть бути утримані іони плазми. Зона утримання плазми радіально обмежена між внутрішнім і зовнішнім радіусами, що підтверджується моделюванням. Іони плазми, що утримуються в пристрої для утримання плазми, в зоні 206 утримання плазми в площині симетрії Р, будуть здійснювати круговий 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 Р симетрії не буде осьової сили Лоренца. Віддаляючись від площини симетрії в осьовому напрямку, вздовж лінії поля, сила Лоренца може штовхнути іон назад до площини симетрії, утримуючи іон у площині симетрії.

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

Фіг.10 показує іншу конфігурацію, яка може бути включена в пристрій утримання плазми, знову ж таки, скомпонований з першою магнітною системою 1, що містить першу котушку 11, призначену для проведення струму в першому напрямку, і другу котушку 12, призначена для проходження струму в другому напрямку, протилежному першому (див. Фіг. 1с); і з другою магнітною системою (не показана), що містить першу і другу концентрично розташовану котушку з кругло-замкненими кільцями (не показано), розташовану дзеркально- симетрично щодо згаданої першої магнітної системи відносно площини Р симетрії, розташованої між першою магнітною системою 1 і другою магнітною системою 2. Так само, як і для прямого магнітного дзеркала на Фіг. 9, область утримання заряджених частинок, тобто зона 206 утримання плазми, є площиною симетрії Р з магнітним полем, нормальним площини симетрії в площині симетрії.

Так само, як обговорювалося вище у поєднанні з Фіг. 9, як показано на Фіг. 10, а також наглядно показане на Фіг. 2, завдяки відповідному вибору геометрії котушок 11, 12 першої магнітної системи та другої магнітної системи 2 і струмів, що передаються в них, можна досягти створення зони 206 утримання заряджених частинок на основі принципу магнітного відбиття конфігурацією поля, що відображає область 1602 з відносно низькою щільністю магнітного потоку поблизу площини Р симетрії і область 1604 з відносно високою щільністю магнітного потоку поблизу котушок 11, 12. Крім того, так само, як і на Фіг. 10, якщо дивитися по радіусу поза межами зони 206, 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 протікають в них, дозволяє значно збільшити щільність магнітного потоку в області 1604 відносно високої щільності магнітного потоку поблизу котушок 11, 12. Це може забезпечити більший коефіцієнт дзеркальності, покращуючи утримання заряджених частинок у плазмі, завдяки зменшеному конусу втрат.

На Фіг.3а і 3b показано першу магнітну систему 1, другу магнітну систему 2 і третю магнітну систему, яка може входити в пристрій утримання плазми (Фіг. 5а і 5b). Якщо спеціально не зазначено нижче, магнітні системи на Фіг. 3а, 3b і на Фіг. 4 мають ті ж особливості та характеристики, що й перша магнітна система та друга магнітна система, описані вище в поєднанні з Фіг. 1а, 1b, 1с і 2. Третя магнітна система 3 розташована радіально зовні, відносно осі А і зони 206 утримання плазми.

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

Третя магнітна система 3 має принаймні одну котушку з кругло-замкненими кільцями, наприклад, як показано, першу котушку 31 з кругло-замкненими кільцями, розташовану на тій же стороні від площини Р симетрії, що і перша магнітна система, і другу котушку 32 з кругло-замкненими кільцями, розташовану на протилежній стороні від площини Р симетрії, при цьому 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, що протікання, коли магнітна система працює, у напрямку в площину поперечного перерізу (позначено колом з точкою) з лівого боку Фіг. 3b і за площину поперечного перерізу (позначено колом з точкою) з правого боку Фіг. 3с, тобто за годинниковою стрілкою, якщо дивитися зверху на першу магнітну систему.

Отримані змодельовані лінії магнітного поля показані на Фіг. 4a і 4b. Конфігурація магнітного поля подібна до конфігурації на Фіг. 2. Зокрема, утворюється кільцева область 206 утримання плазми, як описано вище у поєднанні з Фіг. 1a, 1b, 1с і 2. Фіг. 4b показує квадрант з Фіг. 4a крупним планом. Завдяки властивостям симетрії магнітних систем властивості магнітного поля такого квадранта достатні для опису конфігурації поля в цілому, тобто завдяки дзеркальній симетрії відносно площини Р симетрії та симетрії обертання навколо осі А.

На Фіг.11 показано ще одну конфігурацію, яку може мати пристрій утримання плазми. На додаток до першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2 на Фіг. 10, як і на Фіг. 3a і 3b, третя магнітна система 3 розташована радіально поза зоною утримання плазми 206. Третя магнітна система містить котушки 31 з кругло-замкненими кільцями.

Додатково, з посиланням на Фіг. 11, як обговорювалося вище (Фіг. 9), конфігурація поля, що відображає область 1602 з відносно низькою щільністю магнітного потоку поблизу площини Р симетрії і область 1604 з відносно високою щільністю магнітного потоку поблизу котушок 11, 12, створює зону 206 утримання для заряджених частинок, засновану на принципі магнітного відбиття.

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

Більше того, як і на Фіг. 11, так і на Фіг. 10, відповідний вибір геометрії котушок і струмів, що протікають в них, 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), з допомогою відповідного вибору струму по котушці 31 третьої магнітної системи можна домогтися конфігурації поля з радіально строго зростаючою щільністю магнітного потоку в зоні 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 відповідне феромагнітне екранування. Це фокусує магнітне поле, що дозволяє отримати більший коефіцієнт дзеркальності.

На 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, може бути досягнута конфігурація магнітного поля, де радіальний зовнішній периметр 1202 зони 260 утримання плазми, увесь шлях до точки відбиття, має увігнуті лінії магнітного поля, а також радіальний внутрішній периметр 1204, при цьому щільність магнітного потоку є радіально строго зростаючою.

На кожній з Фіг.5a і 5b показано пристрій 500 утримання плазми, кожен з яких містить першу 1 і другу 2 магнітну систему, які детально описані вище в поєднанні з Фіг. 1a, 1b, 1с, 2, і, за бажанням, третю магнітну систему 3, яка детально описана в поєднанні з Фіг. 3a, 3b, 4a і 4b. Кожен такий пристрій 500 для утримання плазми може застосовуватися в термоядерному реакторі.

Крім того, кожен пристрій 500 для утримання плазми має корпус 208 реактора, який добре відомий у технології плазмового синтезу. Корпус реактора, як показано, може бути розташований між першою магнітною системою 1 і другою магнітною системою 2. Крім того, корпус 208 реактора може, як показано, розташовуватися радіально всередині третьої магнітної системи 3, якщо така система є. Корпус 208 реактора, як показано, може бути обертально симетричним навколо осі А. Корпус реактора 208 розташований так, що кільцева, тороїдоподібна, зона 206 утримання плазми розташована всередині корпусу 208 реактора.

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 наведено типові розміри, які можуть забезпечити хороше утримання альфа-частинок і об'єм плазми приблизно 15 м^3 при технічній щільності струму в магнітних системах 10 А/мм^2 :

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, вбудованого в котушки: 0,6 м – 1,3 м, зазвичай 1,0 м.

Відстань між верхньою кромкою першої магнітної системи 1 і нижньою кромкою 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, щоб керувати плазмою, обмеженою в зоні 206 утримання плазми. Наприклад, можна змінити радіус зони утримання плазми.

На Фіг. 5b показано пристрій 500 утримання плазми, що має відомий, необов'язковий, пристрій 210 мікрохвильового нагрівання плазми, розташований у центрі пристрою 500 по осі А і, таким чином, радіально всередині зони 206 утримання плазми.

Крім того, пристрій 500 утримання плазми може мати відомий, необов'язковий, пристрій 212 для введення іонного пучка, який веде в корпус 208 і розташований радіально поза зоною 206 утримання плазми.

Іонний промінь, наприклад, що містить альфа-частинки високої енергії, може бути введенний з допомогою пристрою 210 для введення іонного пучка радіально в область поза зоною 206 утримання плазми, після чого іонам з іонного пучка може бути дозволено дрейфувати в напрямку меншого радіусу в область 206 утримання плазми, тим самим нагріваючи плазму, яка на наступній фазі може бути такою, що самопідтримується при нагріванні, тобто запаленою плазмою.

Як альтернатива (не показано), іонний промінь, наприклад, що містить альфа-частинки високої енергії, можна вводити з допомогою такого пристрою для введення іонного пучка радіально в область всередині зони 206 утримання плазми, після чого іонам з іонного пучка можна дозволити дрейфувати у напрямку до більшого радіусу в зоні 206 утримання плазми, тим самим нагріваючи плазму.

Таким чином, конструкція пристрою утримання плазми відповідно до цього винаходу забезпечує доступ нагрівальним пристроям як на зовнішньому радіусі, так і в центрі системи.

Як альтернатива, знову ж таки, плазма може нагріватися з допомогою пристрою 210 мікрохвильового нагрівання плазми.

На Фіг. 6, 7 і 8 показані в перспективі з вирізами інші пристрої 500 утримання плазми, що має першу 1, другу 2 і третю 3 магнітні системи, які детально описано вище на Фіг. 13. Пристрій 500 утримання плазми може бути використаний в термоядерному реакторі.

Крім того, як показано на Фіг. 7, пристрій 500 утримання плазми може мати корпус 208 реактора, який добре відомий у технології плазмового синтезу. Як показано, корпус 208 реактора може бути розташований 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, а також радіально зовні та по осі всередині внутрішніх котушок 11, 21 відповідно першої магнітної системи 1 і другої магнітної системи 2.

Далі, на Фіг. 7 показано феромагнітний сердечник 204.

Наприкінці, на Фіг. 8 показано пристрій 500 утримання плазми, що має корпус 1500.

Типові розміри можуть бути такими. Включаючи корпус 1500, пристрій 500 може мати діаметр близько 25 м і висоту близько 35 м. Внутрішній діаметр котушок третьої магнітної системи 3 може становити 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.

Згідно з цим винаходом, загальний струм у системі частинок, тобто плазмі, що утримана, може бути нульовим або близьким до нуля. Це може призвести до значно менш динамічної плазми в порівнянні з реакторами на тороїдальній основі, такими як токамаки. Така менш динамічна плазма може мати менше проблем із нестабільністю плазми, керованою струмом, наприклад, гвинтовою нестабільністю.

Нижче будуть обговорені результати моделювання пристрою утримання плазми відповідно до даної концепції винаходу з посиланням на Фіг. 14a, 14b, 15, 16 і 17, які підтверджують здатність пристрою 500 утримання плазми обмежувати іони плазми синтезу. Утримання термоядерної плазми означає утримання іонів дейтерію, іонів тритію, альфа-частинок та електронів магнітним полем в об'ємі плазми. Альфа-частинки, один із продуктів синтезу дейтерію та тритію, з кінетичною енергією 3,5 MeV (близько 13 000 000 м/с) є найбільш важкими для утримання частинками.

Якщо альфа-частинка може бути утримана, це сприятиме нагріванню плазми так, що запалена плазма буде самопідтримуватися утриманими альфа-частинками. Для горіння плазми потрібна зовнішня енергія, але менша, ніж енергія нагрівання, що виробляється в процесі термоядерного синтезу. Таке нагрівання забезпечується альфа-частинками як продукту синтезу. Таким чином, утримання альфа-частинок є важливим.

Дейтерій і тритій об'єднуються при 12 keV (keV) або навіть нижче. Утримати більш легкий іон при меншій енергії набагато легше, ніж важкий іон при високій енергії. Якщо альфа-частинки як продукт синтезу можуть бути утримані, то іони дейтерію та тритію, а також електрони, також будуть утримані в

тому ж об'ємі, тобто якщо альфа-частинки утримуються, то іони дейтерію та тритію також будуть утримуватися.

Проведено моделювання траєкторій заряджених частинок у магнітному полі, розраховане методом кінцевих елементів (finite element method FEM), перевіряючи можливість утримання заряджених частинок.

Оскільки система є оберально-симетричною, її можна описати при двовимірному (2D) моделюванні. Крім того, оскільки існує дзеркальна симетрія між двома першою магнітною системою та другою магнітною системою, перший квадрант (Фіг. 4b, 9–13) міг би повністю визначити весь об'єм системи.

Траєкторії частинок розраховувалися ітераційно, враховуючи силу Лоренца на частинку та другий закон Ньютона.

На Фіг. 14a, 14b, 15, 16 і 17 показані результати одночастинного моделювання в конфігурації, обговорюваній вище у поєднанні з Фіг. 6, 7, 8 і 13.

На Фіг. 14a показано змодельований шлях дейтрона з кінетичною енергією 100 кеВ, а на Фіг. 14b показаний 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 утримуються в зоні утримання плазми, магнітно відбиваючись у відповідних кінцевих точках. У першому наближенні для заданого вектора початкової швидкості гіроцентр заряджених частинок буде слідувати за заданою лінією поля й відбиватися в тій самій кінцевій точці незалежно від кінетичної енергії чи заряду частинки. Однак, оскільки частинки будуть відрізнятися радіусами гіроскопа (радіус Лармора), дрейф буде відрізнятися.

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

Концепція винаходу в основному була описана вище з посиланням на приклади варіантів здійснення. Однак, зрозуміло, що фахівець в даній області може створювати інші варіанти здійснення, ніж розкриті вище, однаково можливі в рамках концепції винаходу, як це визначено формулою винаходу, що додається.

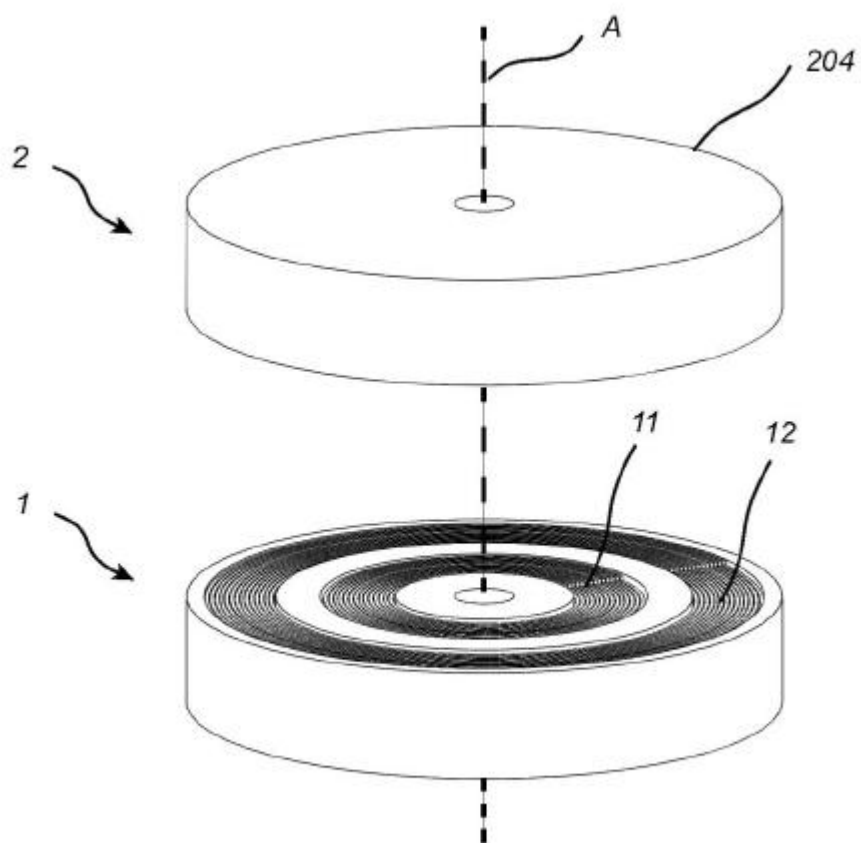


Fig. 1a

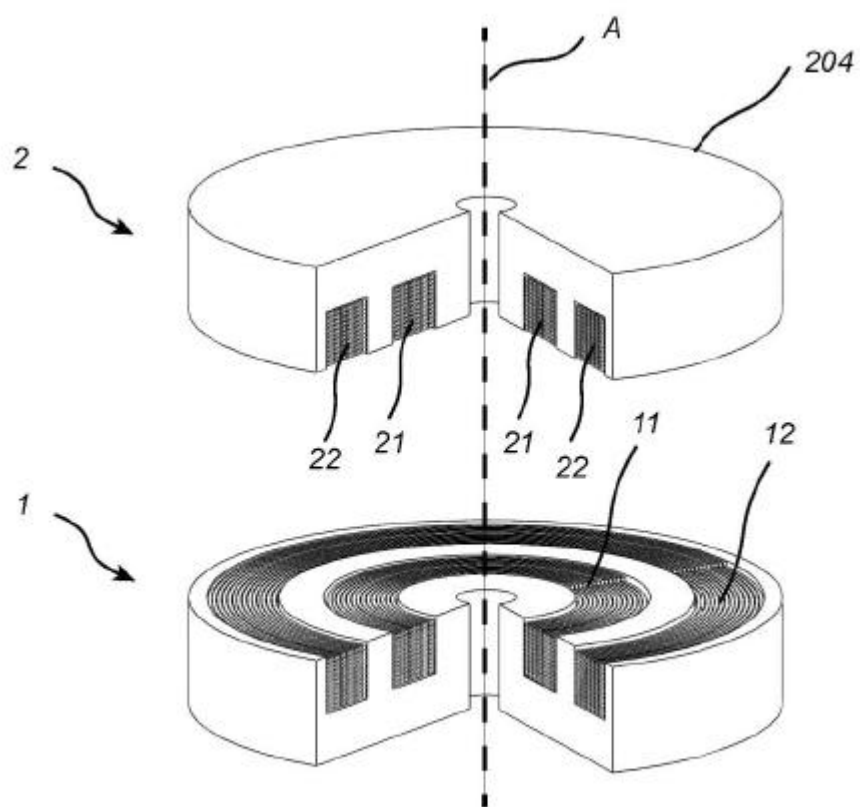


Fig. 1b

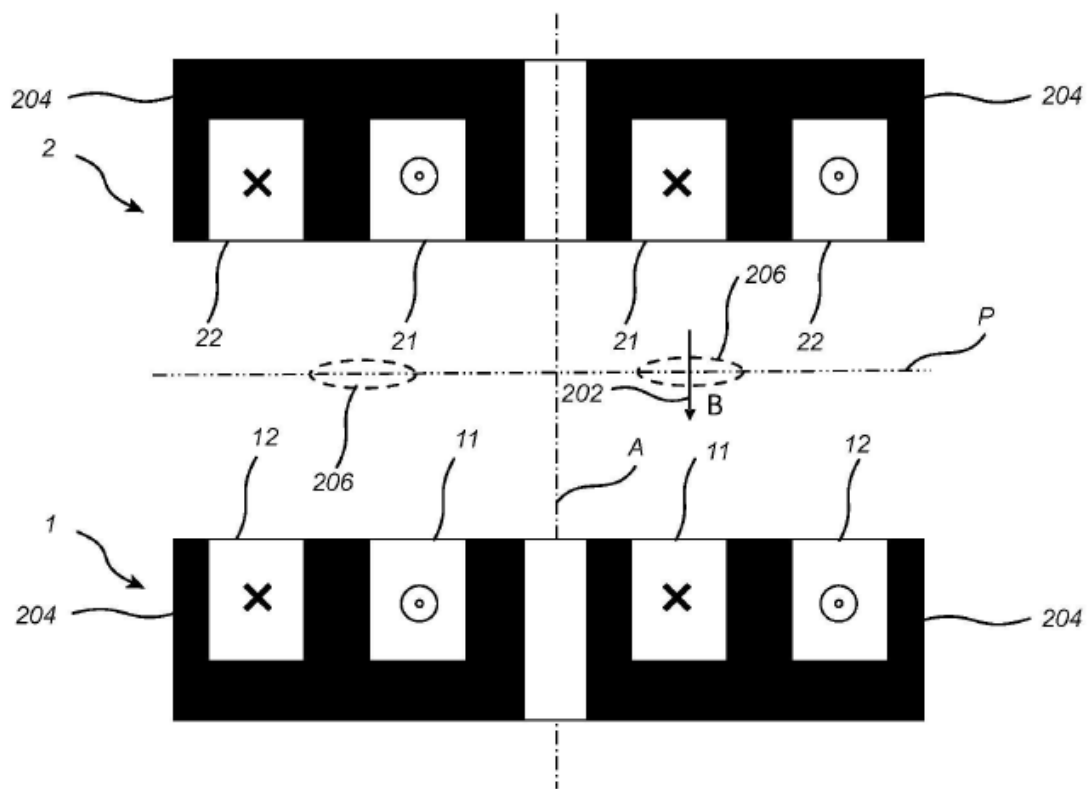


Fig. 1c

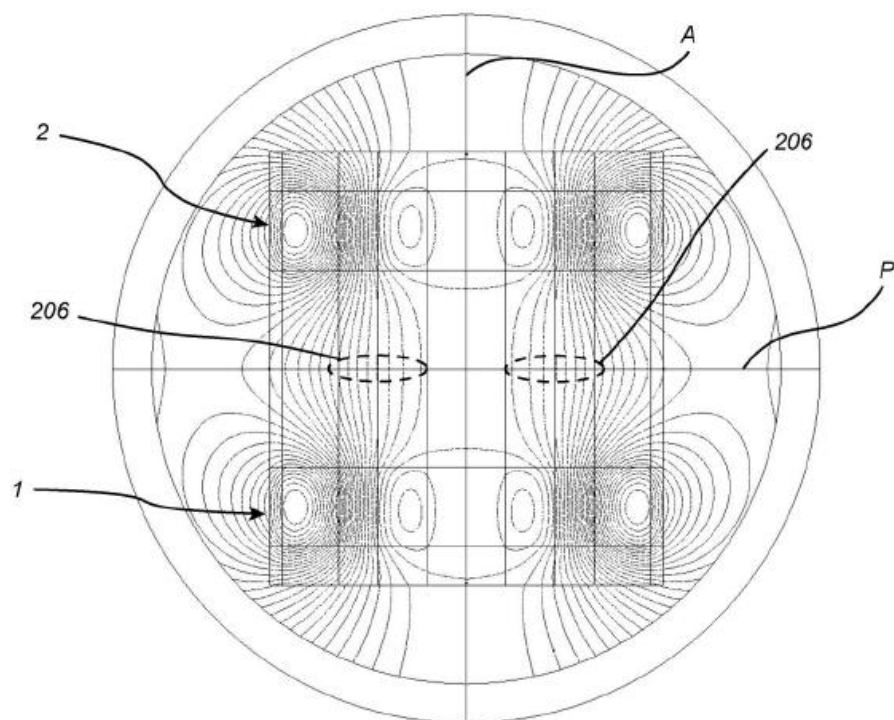


Fig. 2

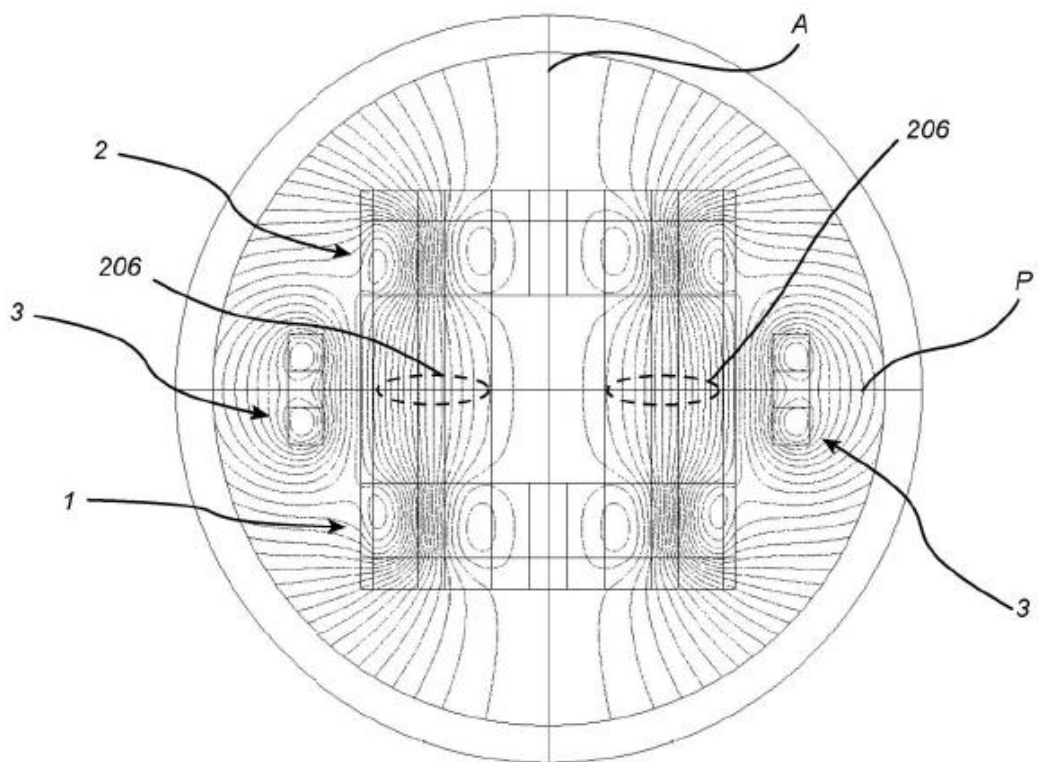


Fig. 4a

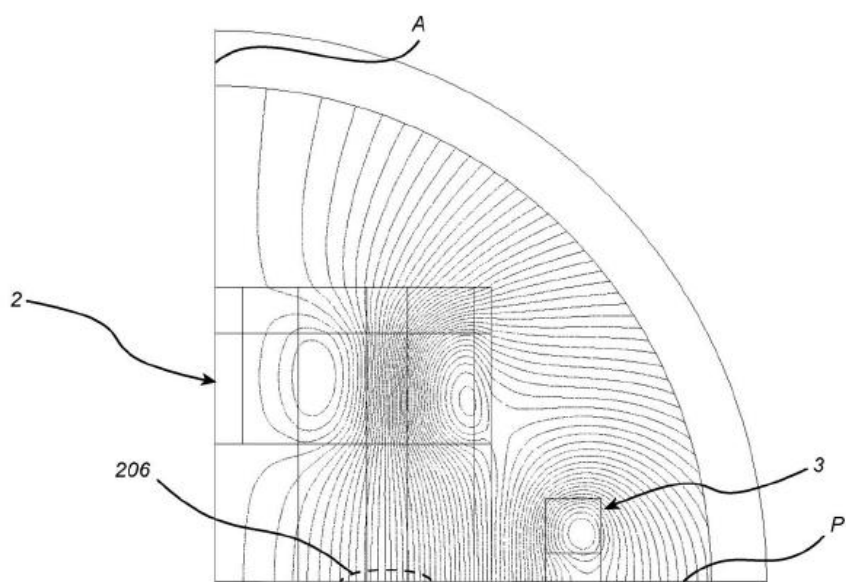


Fig. 4b

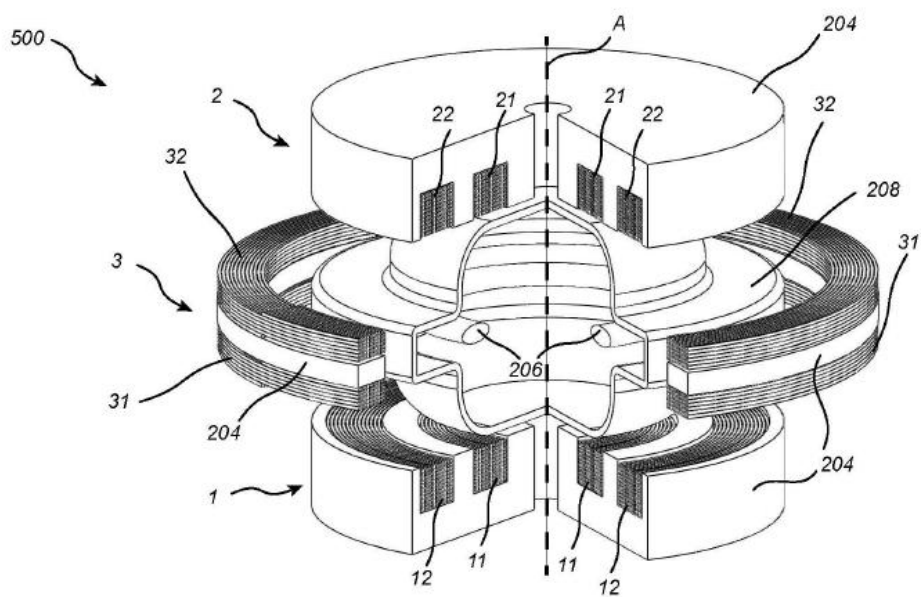


Fig. 5a

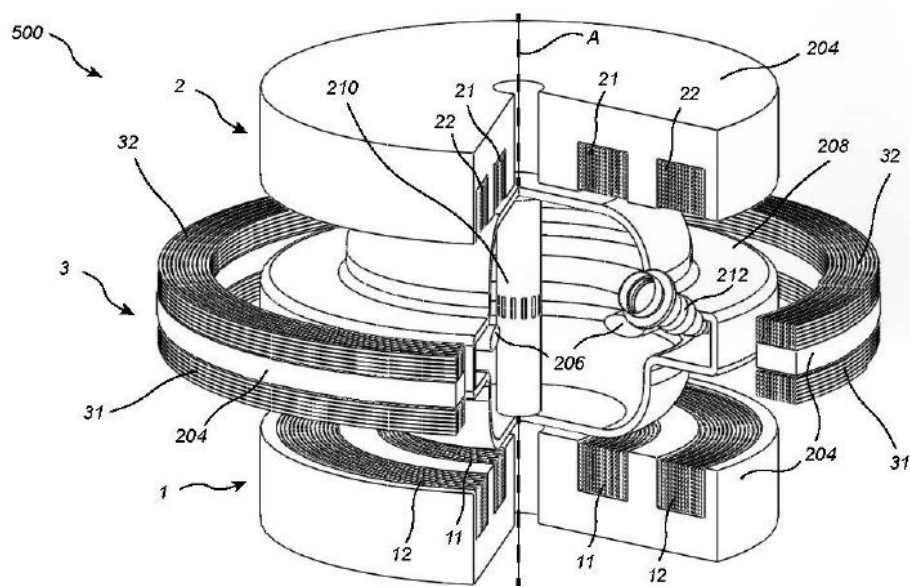


Fig. 5b

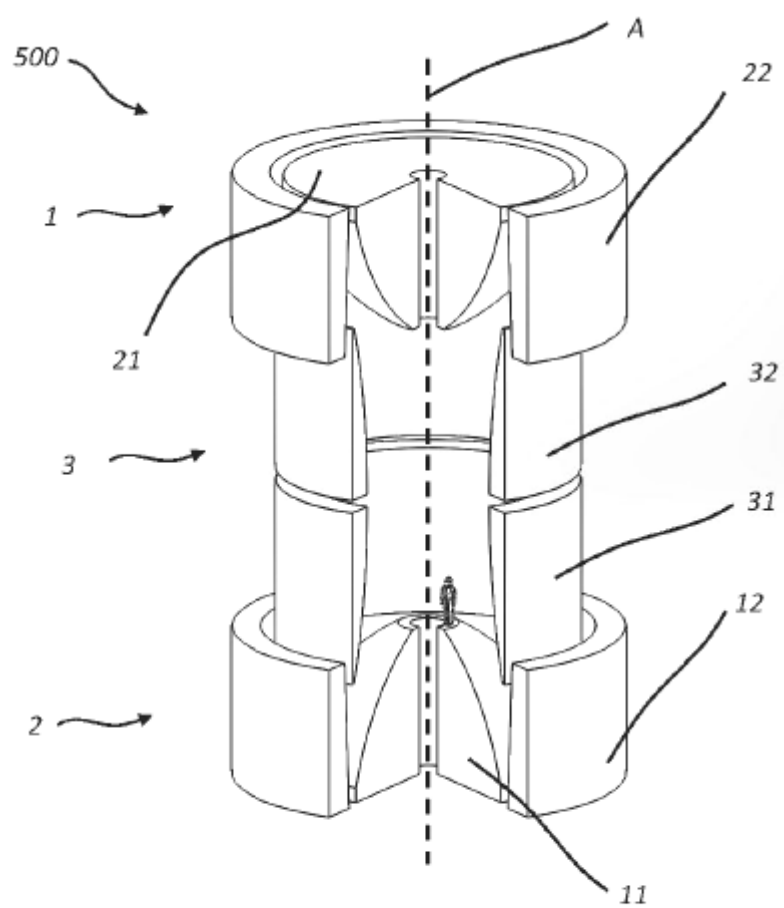


Fig. 6

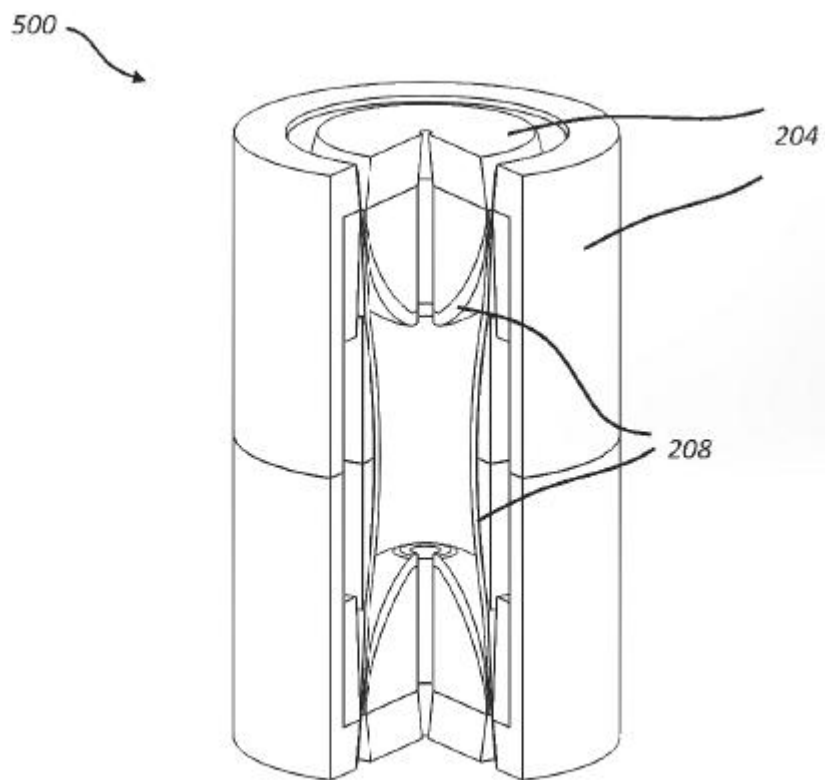


Fig. 7

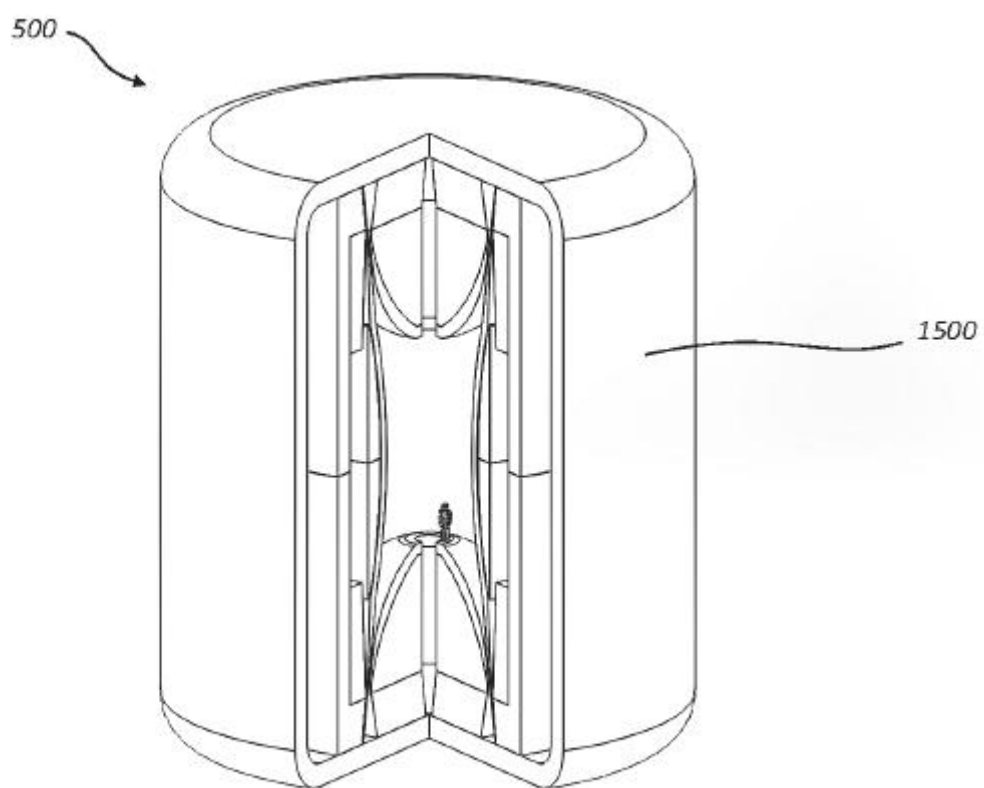


Fig. 8

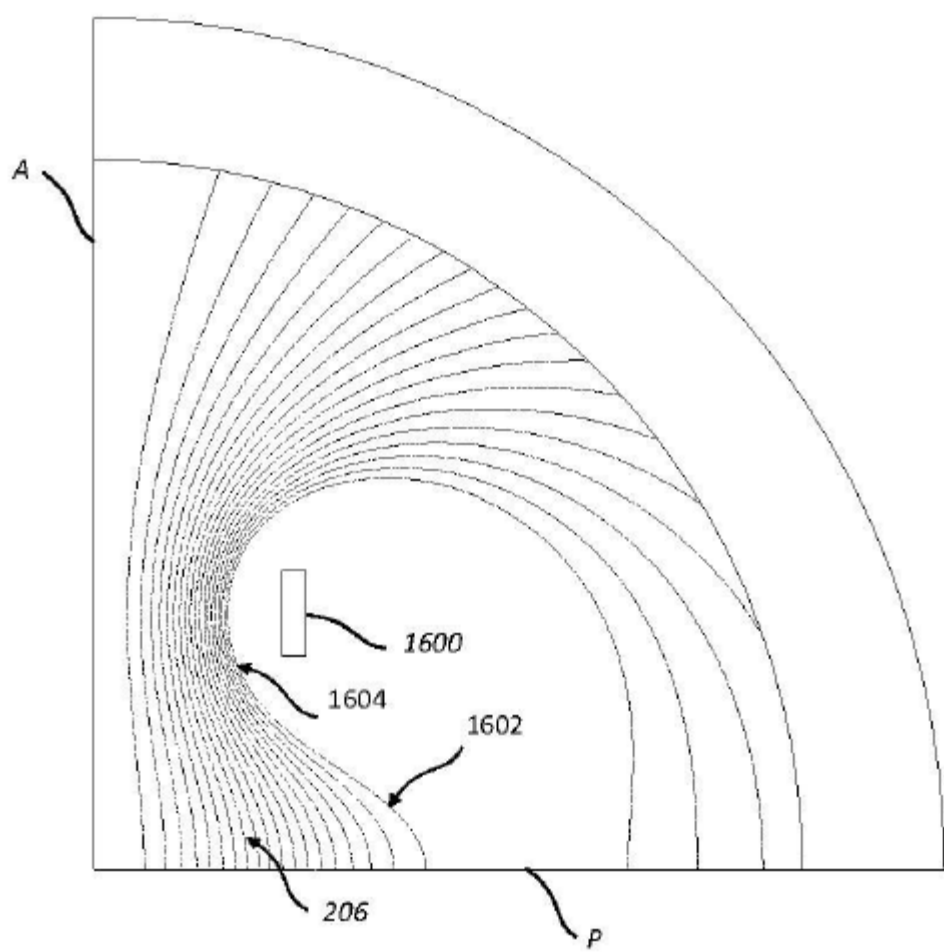


Fig. 9

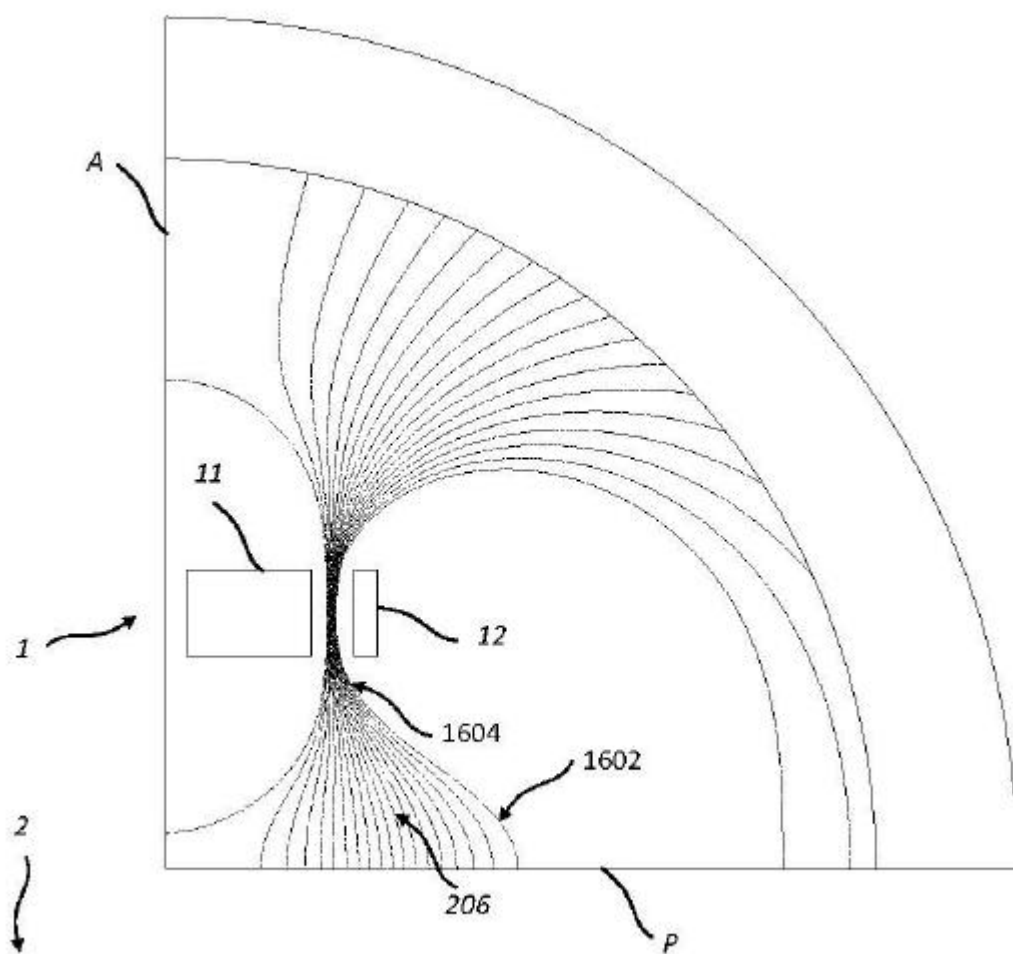


Fig. 10

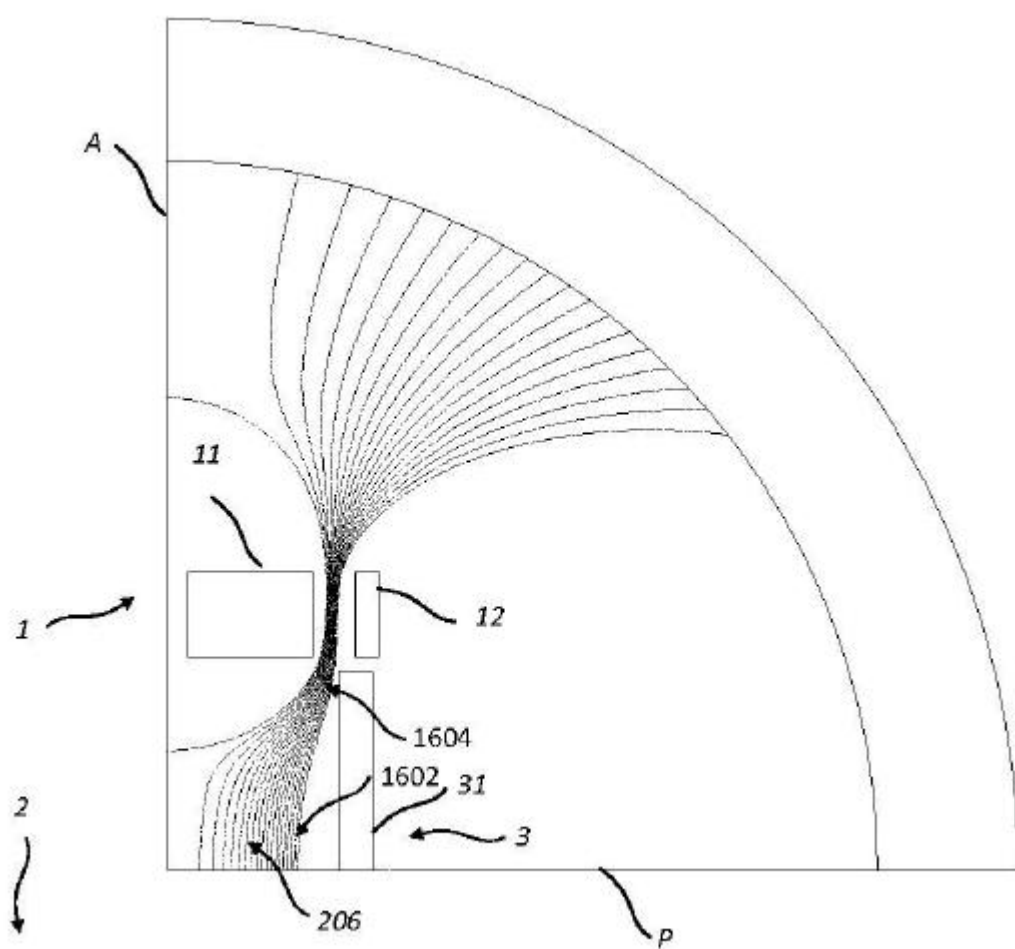


Fig. 11

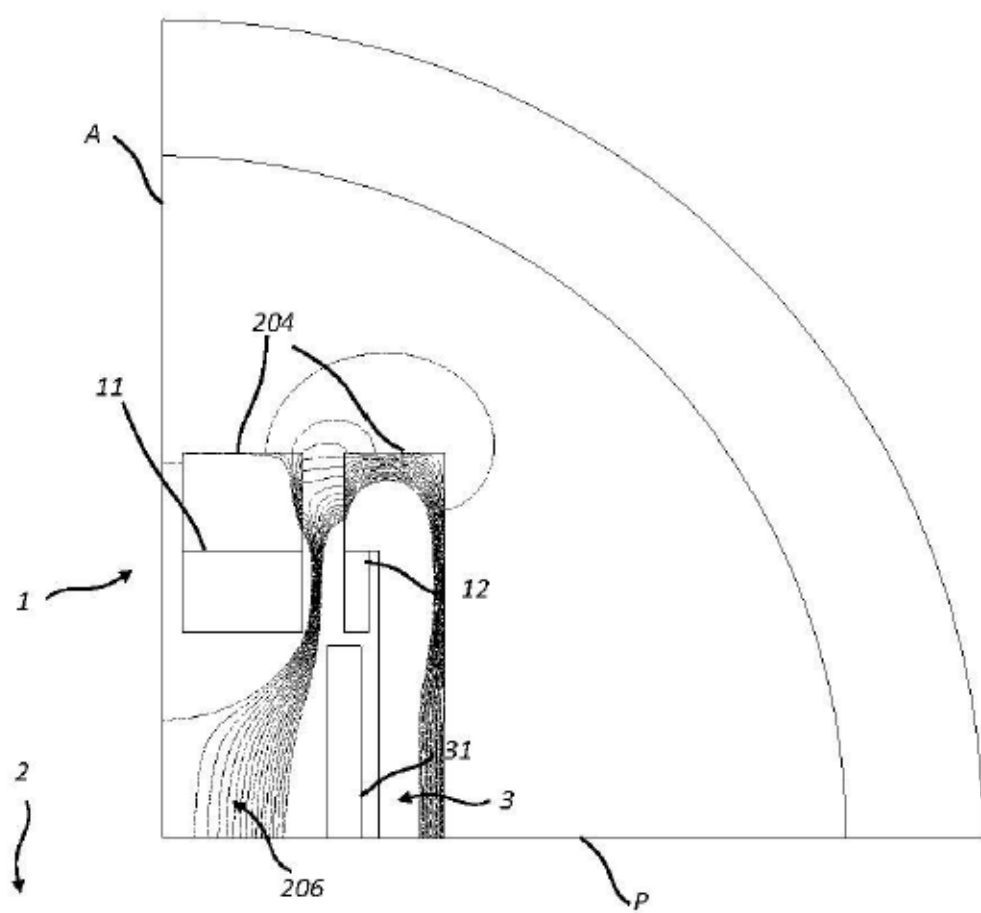


Fig. 12

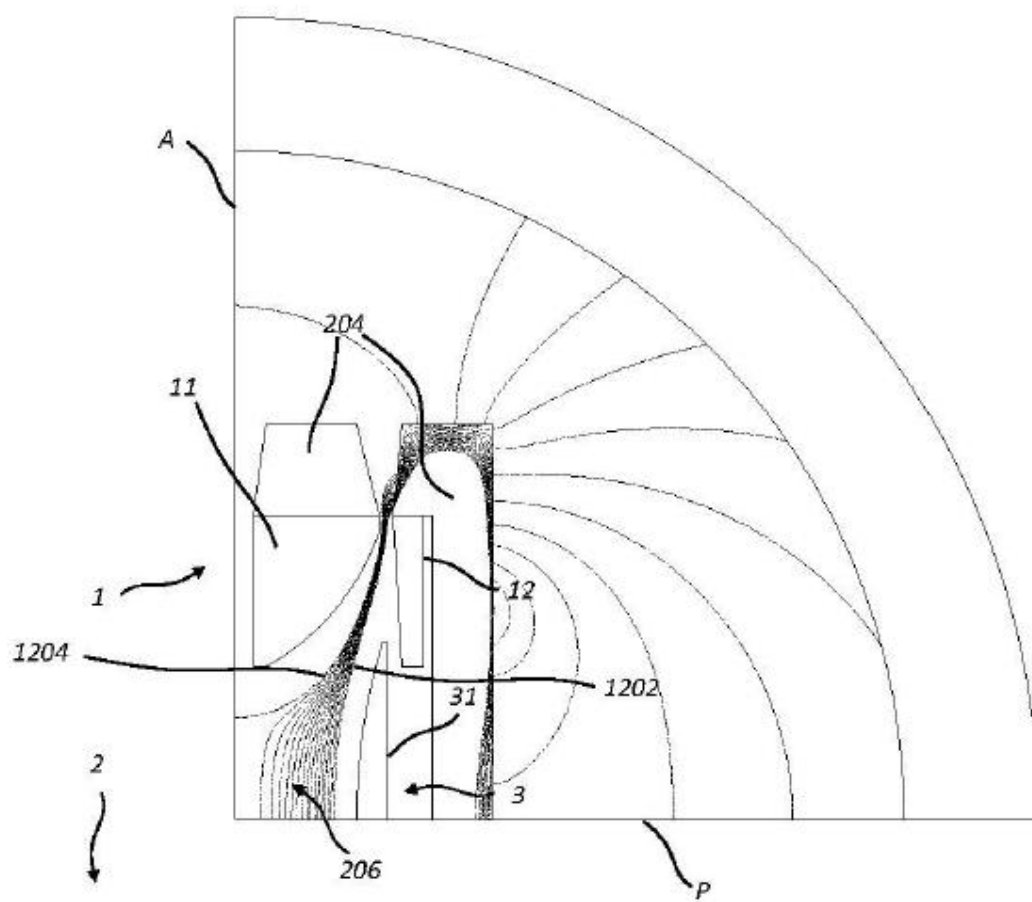


Fig. 13

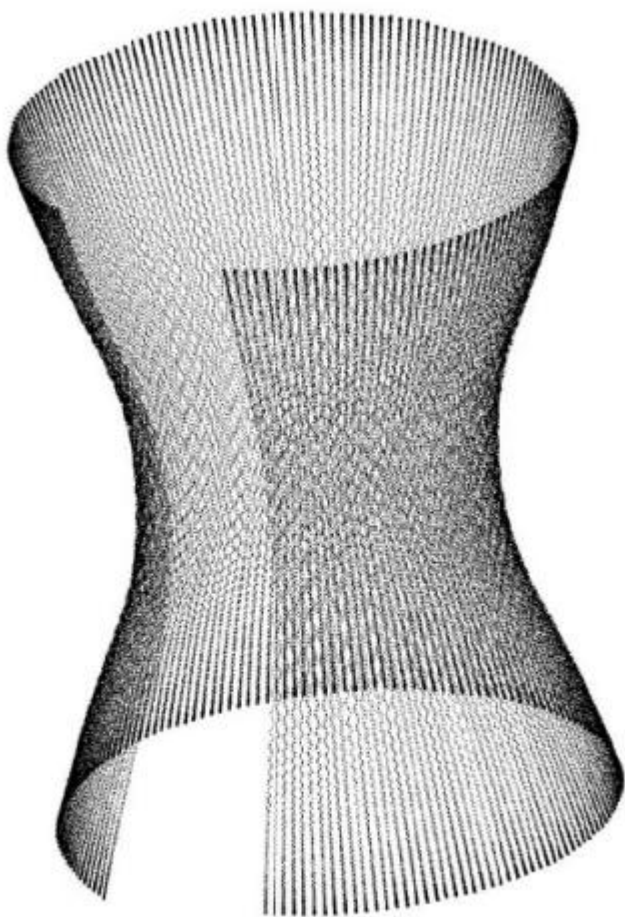
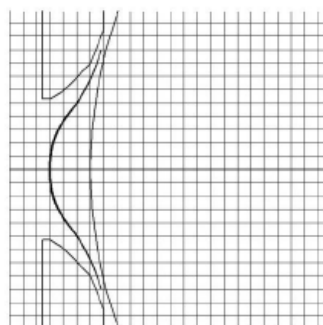
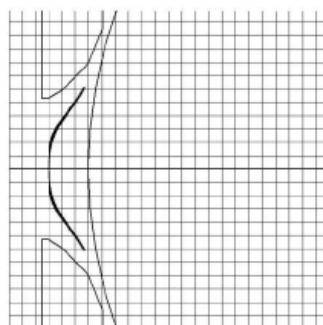
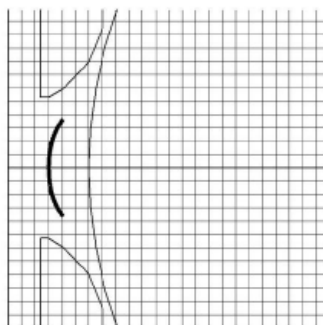


Fig. 14a

Залежність R-Z

Залежність X-Y в площині симетрії P

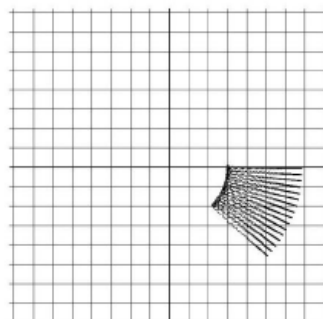
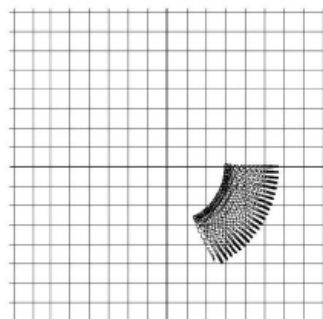
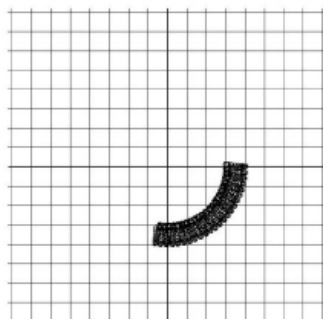


$v_z/v_R = 0.5$

$v_z/v_R = 1.5$

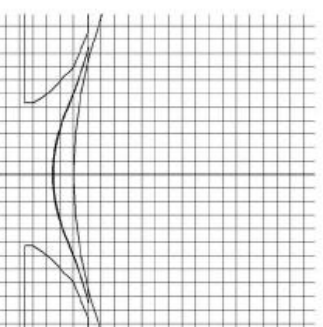
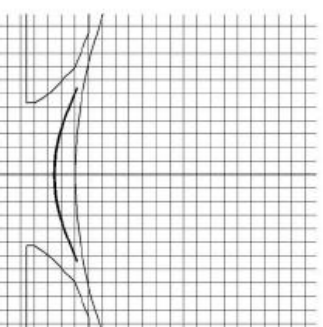
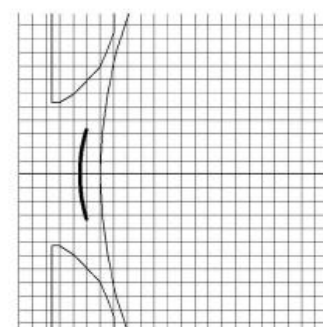
$v_z/v_R = 2.5$

Фиг. 16



Залежність R-Z

Залежність X-Y в площині симетрії P



$v_{||}/v_{\gamma} = 0.5$

$v_{||}/v_{\gamma} = 1.5$

$v_{||}/v_{\gamma} = 2.5$

Фиг. 17

