



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2010112661/07, 02.04.2010

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
02.04.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 02.04.2010

(43) Дата публикации заявки: 10.10.2011 Бюл. № 28

(45) Опубликовано: 27.10.2012 Бюл. № 30

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **Виноградов М.И. Вакуумные процессы и оборудование ионно- и электронно-лучевой технологии.** - М.: Машиностроение, 1989, с.55. RU 2156666 C1, 20.09.2000. RU 2344577 C1, 20.01.2009. RU 2198485 C1, 10.02.2003. US 5218271 A, 08.06.1993. US 7180243 B2, 20.02.2007.

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС М.К.Марахтанову

(72) Автор(ы):

**Духопельников Дмитрий Владимирович**  
(RU),**Марахтанов Михаил Константинович** (RU)

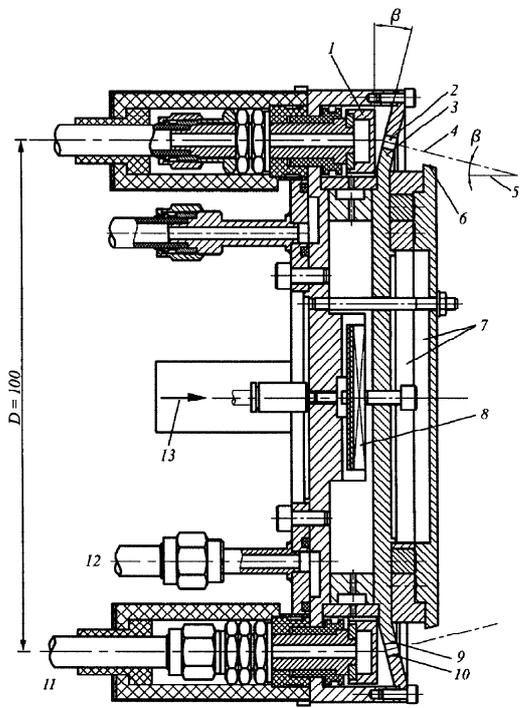
(73) Патентообладатель(и):

**Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана"** (RU)**(54) СПОСОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКИ ИОННОГО ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЕ ПЛАЗМЫ С АЗИМУТАЛЬНЫМ ДРЕЙФОМ ЭЛЕКТРОНОВ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области обработки поверхности твердых материалов с помощью ионных пучков в вакууме, в частности ионно-лучевой полировки или ионного травления оптического стекла, ситалов и кремния. Технический результат - повышение плотности тока ионного источника, например стационарного плазменного двигателя или двигателя с анодным слоем, что обеспечивает повышение производительности или скорости обработки поверхности подложки сфокусированным ионным пучком. В устройстве электромагнитной фокусировки ионного пучка в ускорителе плазмы с азимутальным дрейфом

электронов, содержащем кольцевой ускоряющий канал, объем которого пронизан радиальным магнитным полем, стенки канала выполнены в форме двух коаксиальных усеченных конусов, образующие которых имеют заданный угол схождения  $\beta$ , а ускоритель оборудован внешней системой магнитной фокусировки пучка, работающей на постоянных или на электромагнитах. Ионный пучок формируют с непрерывным однородным заполнением ионами его внутреннего объема путем приведения угла  $\alpha$  азимутального отклонения ионов к нулю с помощью внешнего фокусирующего магнитного поля. 4 ил.



Фиг. 1

RU 2 4 6 5 7 4 9 C 2

RU 2 4 6 5 7 4 9 C 2



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2010112661/07, 02.04.2010

(24) Effective date for property rights:  
02.04.2010

Priority:

(22) Date of filing: 02.04.2010

(43) Application published: 10.10.2011 Bull. 28

(45) Date of publication: 27.10.2012 Bull. 30

Mail address:

105005, Moskva, ul. 2-ja Baumanskaja, 5, MGTU  
im. N.Eh. Baumana, TsZIS M.K.Marakhtanovu

(72) Inventor(s):

**Dukhopel'nikov Dmitrij Vladimirovich (RU),  
Marakhtanov Mikhail Konstantinovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie  
vysshego professional'nogo obrazovanija  
"Moskovskij gosudarstvennyj tehničeskij  
universitet imeni N.Eh.Baumana" (RU)**

(54) **METHOD FOR ELECTROMAGNETIC FOCUSING OF ION BEAM IN PLASMA ACCELERATORS WITH AZIMUTHAL ELECTRON DRIFT**

(57) Abstract:

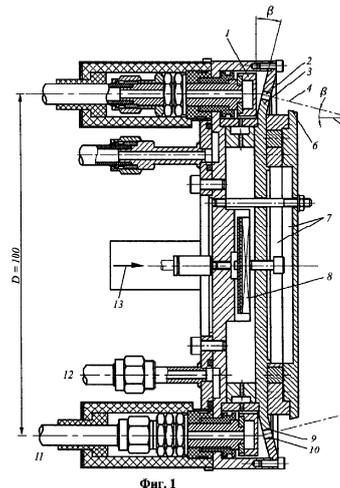
FIELD: physics.

SUBSTANCE: in the device for electromagnetic focusing of an ion beam in a plasma accelerator with azimuthal electron drift, having an annular accelerating channel, the volume of which is penetrated by a radial magnetic field, the walls of the channel are in form of two coaxial flattened cones whose edges have a given convergence angle  $\beta$ , and the accelerator is equipped with an external beam magnetic focusing system operating on permanent or electromagnets. The ion beam is formed with continuous homogeneous filling of its inner volume with ions by reducing the angle  $\alpha$  of azimuthal deviation of ions to zero using an external focusing magnetic field.

EFFECT: high current density of the ion source, eg, a stationary plasma engine or an engine with an

anode layer, which increases efficiency or rate of treating the surface a substrate with a focused ion beam.

4 dwg



Фиг. 1

RU 2 465 749 C2

RU 2 465 749 C2

Изобретение относится к области обработки поверхности твердых материалов с помощью ионных пучков в вакууме, в частности ионно-лучевой полировки или ионного травления оптического стекла, ситалов и кремния.

5 Известны способы полировки или травления поверхности твердых материалов (подложки) с помощью ионно-плазменной технологии в вакууме, когда ионный пучок вытягивают из объема газоразрядной плазмы и затем ускоряют с помощью электрического поля по направлению к обрабатываемой подложке (Форрестер А.Т. Интенсивные ионные пучки: пер. с англ. - М.: Мир. 1992. 354 с.; Хокинг М.,  
10 Вассантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: пер. с англ. - М.: Мир. 2000. 516 с.)

Пучок ионов, ускоренных электрическим полем, бомбардирует подложку, удаляя с нее внешний слой твердого материала, и тем самым полирует поверхность подложки посредством механизма катодного распыления (Плешивцев Н.В., Бажин А.И. Физика воздействия ионных пучков на материалы. М.: Вузовская книга. 1998. 392 с.)  
15

В известном процессе ионной полировки ускоренный пучок состоит, как правило, из ионов аргона, которые вытягиваются из плазмы ускоряющим напряжением  $V = 500 \dots 3000$  В. Каждый ион бомбардирующего пучка выбивает около одного атома из твердого поверхностного слоя подложки. Скорость ионной полировки зависит от коэффициента катодного распыления материала подложки:  $S =$  (число распыленных атомов / число бомбардирующих ионов). Это величина статистическая. Она, в свою очередь, зависит от материала и энергии бомбардирующих ионов, а также от материала обрабатываемой поверхности, и изменяется в диапазоне  $S = 0,4 \dots 2,5$   
20  
25 (Плешивцев Н.В., Бажин А.И., см. выше).

Известен способ полировки или очистки поверхности кремния, оптического стекла и ситала с помощью известного ускорителя плазмы с азимутальным или замкнутым дрейфом электронов (Гришин С.Д., Косогоров А.В., Марахтанов М.К., Суслов Н.И. Использование плазменного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов для ионной  
30 очистки поверхности // Электронная обработка материалов. 1978. №6. С.72-73;

Электростатические плазменные двигатели с анодным слоем. - В кн. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том. Книга IV. Под ред. акад. В.Е.Фортова. - М.: Наука. 2000. С.311-316). В англоязычной литературе ускоритель плазмы с азимутальным или замкнутым дрейфом электронов называют холловским ускорителем (Hall Effect Thruster).  
35

Известный ускоритель с азимутальным дрейфом электронов содержит кольцевой ускоряющий канал щелевидной формы и плоский кольцевой анод, расположенный в  
40 нескольких миллиметрах перед каналом и перекрывающий кольцевое основание канала. Стенки канала являются цилиндрическими поверхностями, чьи образующие перпендикулярны плоскости анода. Длина ускоряющего канала составляет обычно  $L = 2 \dots 10$  мм. Благодаря геометрии указанных узлов, ионный пучок, истекающий из канала, имеет форму тонкостенного цилиндра, у которого внутренняя часть пучка не  
45 заполнена ускоренным ионным потоком. Подобный пучок удаляет с подложки лишь кольцевой слой материала, а центральная часть внутри удаленного кольца остается незатронутой ионной обработкой. Ускоритель имеет собственную магнитную систему из постоянных магнитов или из электромагнитов. Магнитопровод системы является  
50 плоским диском, на периферии которого прорезана кольцевая щель ускоряющего канала, названного выше. Магнитная система создает в ускоряющем канале радиальное магнитное поле, пронизывающее ионный поток. Ионы движутся в канале перпендикулярно магнитным силовым линиям, которые фокусируют ионный поток

вследствие эффекта магнитоплазменной линзы (Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. - М.: Физматлит.2006. 576 с.). Благодаря эффекту линзы можно изменять геометрию пучка, истекающего из ускорителя, придавая ему, в частности, слабо выраженную конусообразную форму. Плазмообразующий газ поступает в зазор между анодом и ускоряющим каналом, где он ионизируется и поставляет ионы в канал для их дальнейшего ускорения.

Известны две схемы ускорителя с азимутальным дрейфом электронов. В одной из них используются тонкие кольцевые изоляторы, закрывающие стенки ускоряющего канала от ионного потока внутри последнего. Тогда ускоритель называют стационарным плазменным двигателем (СПД). Если указанные изоляторы отсутствуют, то подобное устройство называют двигателем с анодным слоем (ДАС). Принцип ускорения и фокусировки ионного пучка одинаков в обеих схемах. Для унификации определений будем называть плоскостью АА поперечное сечение ускоряющего канала или то место, где формируется структура ионного пучка. Плоскостью ВВ назовем поперечное сечение пучка там, где он встречается с обрабатываемой поверхностью подложки.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому изобретению является промышленный ускоритель плазмы (источник ионов) с азимутальным дрейфом электронов типа «РАДИКАЛ», выполненный по схеме двигателя с анодным слоем (Виноградов М.И., Маишев Ю.П. Вакуумные процессы и оборудование ионно-и электронно-лучевой технологии. - М.: Машиностроение. 1989. 55 с.). Стандартный ускоритель «РАДИКАЛ» имеет кольцевой ускоряющий канал, выточенный в форме сквозной кольцевой щели в плоском диске магнитопровода. Средний диаметр кольцевой щели ускоряющего канала равен  $D=100$  мм, ширина кольцевой щели, образующей канал, составляет 5 мм, длина ускоряющего канала (равная толщине диска магнитопровода)  $L=4$  мм. Канал обеспечивает генерацию ионного пучка, у которого сила тока равна 0,100 А при токовом КПД 0,5...0,75 и массовом КПД 0,045...0,055. Ускоритель работает без катода-нейтрализатора, т.е. с компенсацией объемного заряда ионного пучка свободными электронами, образующимися за счет ионизации остаточного газа в вакуумной камере. Ускоритель «РАДИКАЛ» содержит водоохлаждаемый кольцевой анод, сделанный из немагнитного металла, а также катушку электромагнита. Плоскость магнитопровода (или плоскость поперечного сечения кольцевого ускоряющего канала) параллельна плоскости кольцевого анода. Если угол между плоскостями магнитопровода и анода обозначить буквой  $\beta$ , то для ускорителя «РАДИКАЛ» будет справедливо равенство;

$$\beta = 0 \quad (1)$$

Ускоряющее напряжение в известном устройстве «РАДИКАЛ» составляет  $F=1500...3000$  В. Его создает источник постоянного тока, от которого разность потенциалов устанавливают между кольцевым анодом (положительный потенциал), размещенным перед полостью ускоряющего канала внутри ускорителя, и обрабатываемой деталью (отрицательный катод), расположенной вне ускорителя, т.е. ниже по потоку ионного пучка. Если деталь-подложка является диэлектриком, то потенциал катода подают на металлическую раму, в которой крепится деталь, и на металлические стенки вакуумной камеры.

Силовые линии магнитного поля, локализованные как внутри ускоряющего канала, так и в области, примыкающей к нему ниже по потоку ионов, играют роль магнитоплазменной линзы по отношению к ионному потоку, см. выше. Поэтому траектории ионов принимают направление нормалей по отношению к магнитным

силовым линиям, когда они движутся как в канале ускорителя, так и на выходе из него. В зависимости от конфигурации магнитного поля пучок в целом становится или полым, цилиндром или слабо сходящимся (расходящимся) конусом.

5 Недостатком известного способа ионной полировки является то, что в известном ускорителе «РАДИКАЛ» стенки ускоряющего канала имеют цилиндрическую, а не коническую форму, что затрудняет сообщение ионному пучку формы конуса, вершина которого фокусируется на подложке. В силу геометрии ускоряющего канала и конфигурации магнитного поля в нем ионный пучок известного ускорителя  
10 «РАДИКАЛ» вытравливает на подложке лишь канавку в форме кольца, а не круга, поскольку ускоренные ионы не могут попасть внутрь пучка, имеющего форму полого цилиндра. Поэтому материал подложки не удаляется из центральной части кольцевой канавки, тогда как в ряде случаев требуется, чтобы материал, распыляемый ионным пучком, был удален со всей площади подложки, ограниченной поперечным сечением  
15 ионного пучка. Устройство известного ускорителя «РАДИКАЛ» не позволяет также изменять площадь сечения ионного пучка на обрабатываемой. Тем самым ограничивается возможность контролировать плотность ионного тока на подложке, а следовательно, ограничивается возможность управлять скоростью обработки  
20 (скоростью катодного распыления) подложки.

Задачей предлагаемого изобретения является создание способа, позволяющего с помощью электромагнитного поля, сфокусировать кольцевой пучок ионов на поверхности подложки таким образом, чтобы глубина выработки материала подложки захватывала всю поверхность круга внутри границы поперечного сечения  
25 пучка, оставляемого на подложке. Иными словами, требуется, чтобы поперечное сечение ионного пучка на подложке перестало быть кольцом, но стало кругом. Вместе с тем предлагаемый способ позволит регулировать плотность ионного тока пучка на поверхности подложки.

30 Вышеуказанный технический результат достигается тем, что предлагаемый способ электромагнитной фокусировки ионного пучка осуществляют в ускорителе плазмы с азимутальным дрейфом электронов, содержащем кольцевой ускоряющий канал, стенки которого имеют форму двух коаксиальных цилиндров, объем канала пронизан радиальным магнитным полем, стенки канала выполнены в форме двух коаксиальных  
35 усеченных конусов, образующие которых имеют заданный угол схождения  $\beta$ , ускоритель оборудован внешней системой магнитной фокусировки пучка, работающей на постоянных магнитах или на электромагнитах. При этом угол  $\alpha$  азимутального отклонения ионов, полученный ими в ускоряющем канале, приводят к нулю с помощью внешнего фокусирующего магнитного поля  $B_f$ , которое создают  
40 внешней системой магнитной фокусировки пучка, для чего азимутальный угол  $\alpha$  и магнитную индукцию  $B_f$  устанавливают по формулам:

$$45 \alpha \approx 7,9 \cdot 10^5 \frac{L B_r}{\sqrt{VA}},$$

где:  $L$  - длина ускоряющего канала ускорителя плазмы;  $B_r$  - индукция радиального магнитного поля в ускоряющем канале;  $V$  - ускоряющее напряжение;  $A$  - атомная масса иона, а.е.м.;

$$50 \bar{B}_f = -\frac{L}{l} \bar{B}_r,$$

где:  $L$  - длина ускоряющего канала ускорителя плазмы;  $B_r$  - вектор индукция радиального магнитного поля в ускоряющем канале;  $l$  - протяженность зоны действия

фокусирующего поля  $V_f$  на траекторию иона вне ускоряющего канала.

Сущность изобретения поясняется фиг. 1, 2, 3 и 4. На фиг.1 представлена общая схема устройства. На фиг.2 показаны ускоряющий канал, а также конический полюс фокусирующей магнитной системы и схема расположения векторов электромагнитного поля. На фиг.3 представлена схема траекторий отдельных ионов в ускоренном пучке, а также их угловая ориентация относительно продольной оси пучка и плоскостей ускоряющего канала и полируемой подложки. На фиг.4 показаны результаты травления (полировки) ситала сфокусированным пучком ионов аргона.

Предлагаемое устройство содержит кольцевой водоохлаждаемый анод 1, сделанный из немагнитного металла, а также кольцевой ускоряющий канал 2 длиной  $l=4$  мм и шириной 5 мм. Угол схождения пучка или угол между осями 4 и 5 (13) равен  $\beta$ . Поверхность 6 имеет коническую форму и является полюсом внешней фокусирующей магнитной системы 7. Угол наклона образующей полюса 6 в данном случае сделан равным  $\beta$  градусов, хотя в общем случае он может иметь и другое значение. Ускоритель имеет собственную магнитную систему 8, состоящую из постоянных магнитов; обе стенки 9 и 10 ускоряющего канала 2 имеют форму усеченного конуса с углом наклона образующей, равным  $\beta$  градусов. Вода, охлаждающая анод, подается через нижний патрубок 11 и вытекает через верхний симметричный патрубок. Магнитопровод ускорителя охлаждается также водой, поступающей в него через патрубок 12 и вытекающей через симметричный ему верхний патрубок. Плазмообразующий газ (аргон) поступает в патрубок на оси ускорителя 13 и проходит в полость между анодом 1 и магнитопроводом 3, см. фиг.1.

В ускоряющем канале 2 локализируются продольное электрическое поле с напряженностью  $E$ , а также радиальное магнитное поле с индукцией  $V_r$ . Ионы покидают канал со скоростью  $v_i$ , направленной перпендикулярно вектору магнитной индукции  $V_r$  (см. выше эффект магнитоплазменной линзы). Фокусирующее магнитное поле  $V_f$  направлено по радиусу ионного пучка так же, как и поле  $V_r$ , но оба вектора имеют противоположное друг другу направление фиг.2.

Обозначим плоскость поперечного сечения ускоряющего канала как АА, а параллельную ей плоскость поверхности обрабатываемой подложки как ВВ. На длине пучка АВ траектория ускоренного иона ориентирована по двум направлениям: это угол схождения  $\beta$  в плоскости, заключающей продольную ось 13, и азимутальный угол  $\alpha$  в плоскости, перпендикулярной оси 13, см. фиг.3. Именно наличие азимутального угла

$$\alpha \neq 0$$

не позволяет уменьшить до нуля диаметр пятна  $d$ , оставленного ионным пучком на подложке, т.е. не позволяет вытравливать на подложке сплошной круг, вместо кольца.

Возможность обработать ионным пучком полный круг, вытравив в его центре больше материала, чем на периферии, показана на фиг.4. Согласно предлагаемому устройству и способу электромагнитной фокусировки ионный пучок фокусируется в правильный конус, остроконечная вершина которого лежит на поверхности полируемой подложки.

Предлагаемое устройство работает следующим образом. По сравнению с известным ускорителем плазмы с азимутальным дрейфом электронов, в котором ускоряющий канал имеет цилиндрические стенки, в предлагаемом устройстве стенкам 9 и 10 придают новую, конусообразную форму, см. фиг.1. Угол  $\beta$ , под которым указанные стенки наклонены к продольной оси 5 (13) ускорителя, задают исходя из размеров установки и из технических требований процесса полировки

подложки. Предлагаемый ускоритель плазмы вместе с обрабатываемой деталью-подложкой помещают в вакуумную камеру.

Анод 1 соединяют с положительным полюсом источника питания постоянного тока. Отрицательный полюс того же источника соединяют с металлическим корпусом вакуумной камеры, а также с металлическим держателем подложки, если последняя выполнена из диэлектрика. Между анодом ускорителя и корпусом вакуумной камеры устанавливается напряжение, например  $V=1500...3000$  В, названное здесь ускоряющим напряжением. Его величину контролируют, регулируя напряжение на полюсах источника питания. Плазмообразующий газ, например аргон, подают в ускоритель через трубопровод 13 и заполняют им внутренний объем ускорителя, расположенный между анодом 1 и магнитопроводом 3, а также объем ускоряющего канала 2. При определенном соотношении ускоряющего напряжения  $V$ , давления плазмообразующего газа, а также индукции  $B_r$  радиального магнитного поля в ускоряющем канале 2 загорается электрический разряд и возникает газоразрядная плазма.

Благодаря воздействию поперечного магнитного поля  $B_r$  электронная компонента плазмы теряет свою подвижность в направлении длины канала 2. Тогда большая часть приложенного напряжения сосредотачивается на длине  $L$  ускоряющего канала, и напряженность  $E$  электрического поля становится достаточной для сообщения ионам заданной величины скорости  $v_i$ . В результате эффекта магнитоплазменной линзы вектор скорости  $v_i$  каждого иона получает угол схождения  $\beta$  по отношению к центральной оси 13 конусообразного ионного пучка, см. фиг.2. Если бы каждый ион пучка получал в ускоряющем канале 2 лишь единственное отклонение по углу схождения  $\beta$  относительно центральной оси 13, то пучок можно было бы сфокусировать на подложке в форме круга с центральной частью, заполненной ионным потоком. Это означает, что в сечении ВВ, лежащем на подложке, диаметр  $d$  стал бы равен нулю, см. фиг.3. Однако этого не происходит, так как траектория иона отклоняется в канале (или в сечении АА) еще и на азимутальный угол  $\alpha$ . Причина подобного отклонения состоит в следующем.

Когда положительный ион движется со скоростью  $v_i$  вдоль длины  $L$  ускоряющего канала, на него действует отклоняющая сила Лоренца со стороны магнитного поля  $B_r$ . Величина и направление этой силы определяются векторным произведением

$$\vec{F}_r = e[\vec{v}_i \times \vec{B}_r] \quad (2)$$

где  $e=1,9 \cdot 10^{-19}$  Кл - заряд иона, см. фиг.2. Согласно уравнению (2) эта сила направлена по азимуту внутри ускоряющего канала 2. Поэтому ион отклоняется данной силой от движения по образующей 4 конического пучка и движется еще и по траектории С, составляющей угол  $\alpha$  в азимутальном направлении с образующей 4, см. фиг.3.

Таким образом, траектория иона, проходящего ускоряющий канал  $L$ , стенки которого выполнены конической формы, изменяется по двум координатным углам: азимутальному углу  $\alpha$  и углу схождения  $\beta$ . В известном ускорителе с каналом цилиндрической формы изменяется лишь угол  $\alpha$ , см. уравнение (1). Угол  $\beta$  является полезным рабочим параметром, позволяющим сфокусировать ионный пучок в виде конуса и тем самым увеличить плотность ионного тока  $j_i$  на поверхности подложки ВВ. Угол  $\alpha$  является нежелательным параметром, поскольку его наличие не позволяет уничтожить окружность диаметром  $d \neq 0$  необработанной поверхности на полируемой подложке ВВ, см. фиг.3.

Азимутальный угол  $\alpha$  устанавливают по формуле

$$\alpha \approx \frac{L}{R} \frac{180}{\pi} \approx 57 \frac{L}{R} \text{ град,} \quad (3)$$

где:

L - длина ускоряющего канала;

R - циклотронный радиус иона.

Циклотронный радиус также устанавливают по формуле:

$$R \approx \frac{1}{2} \frac{m v_i}{e B_r} \approx \frac{1}{2 B_r} \sqrt{\frac{2 V m_p A}{e}} \approx \frac{1}{2 B_r} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ VA}}{1,6 \cdot 10^{-19}}} \approx \frac{7,22 \cdot 10^{-5}}{B_r} \sqrt{\text{VA}}, \quad (4)$$

где:

m - масса иона;

$v_i$  - скорость иона;

$B_r$  - магнитная индукция в ускоряющем канале, см. фиг.2;

V - ускоряющее напряжение;

$m_p$  - масса протона, равная  $1,67 \cdot 10^{-27}$ , кг;

A - атомная масса иона, а.е.м.

Подставив уравнение (4) в уравнение (3), получим искомый угол азимутального отклонения иона в ускоряющем канале:

$$\alpha \approx \frac{57 L B_r}{7,22 \cdot 10^{-5} \sqrt{\text{VA}}} \approx 7,9 \cdot 10^5 \frac{L B_r}{\sqrt{\text{VA}}} \quad (5)$$

Для эффективной фокусировки пучка параметрам, входящим в уравнение (5), придают такую величину, чтобы азимутальный угол  $\alpha$  стал равен нулю. Для этого магнитную индукцию  $B_f$  внешней фокусирующей магнитной системы 7, см. фиг.1, 2, устанавливают по формуле:

$$\bar{B}_f = -\frac{L}{l} \bar{B}_r, \quad (6)$$

где:

L - длина ускоряющего канала;

l - протяженность зоны действия фокусирующего поля  $B_f$  на траекторию иона, покинувшего ускоряющий канал;

$B_r$  - магнитная индукция в ускоряющем канале, см. фиг.3.

Вектор магнитной индукции  $B_f$  направлен так, чтобы отклонять траекторию каждого иона, покинувшего ускоряющий канал, в сторону, противоположную отклонению, полученному ионом от вектора радиальной магнитной индукции  $B_r$  внутри ускоряющего канала. При этом длину зоны l определяют по формуле:

$$l = (0,1 \dots 3,5)L. \quad (7)$$

В результате указанных действий ионный пучок, истекающий из предлагаемого ускорителя с азимутальным дрейфом электронов, будет сфокусирован в виде конуса, вершина которого находится на поверхности обрабатываемой подложки. Угол между образующими при вершине конуса будет равен  $2\beta$ . Поперечное сечение пучка примет форму круглого пятна на поверхности обрабатываемой подложки, и пучок перестанет вытравливать на подложке кольцевую канавку. Теперь предлагаемый ускоритель ионов будет вытравливать круглое пятно на обрабатываемой поверхности. Заданная скорость  $v_i$  каждого иона в пучке будет обеспечена напряжением V, приложенным между анодом ускорителя и корпусом вакуумной камеры, а также напряженностью E электрического поля, которую устанавливают в ускоряющем канале.

На фиг.4 представлен график  $h(R)$  или профиль глубины выработки ситаловой (СО-115 м) подложки сфокусированным ионным пучком. График построен в зависимости от радиуса  $R$  сечения ионного пучка на поверхности подложки.

Положение продольной оси пучка соответствует координате  $R=0$  мм. Плоскость обрабатываемой поверхности нормальна к продольной оси ионного пучка. В верхней части фиг.4 представлена интерферограмма, по расположению полос которой определяли глубину выработки подложки. Диаметр зоны обработки ионным пучком равнялся  $2R=36$  мм. Время обработки 10 мин.

В таблице представлены результаты обработки ситаловой подложки коническим ионным пучком, сфокусированным электромагнитным полем. При обработке использовали внешнюю магнитную систему, с помощью которой внешнее магнитное поле  $B_f$ . На подложке был вытравлен круг с максимальной глубиной выборки ситала в центре пучка  $R=0$ , см. также фиг.4. Видно, что максимальная скорость травления ситала составила  $\dot{h}_{\max} = 112$  нм/мин в центре обработанного круга. Известно, что в большинстве случаев скорость механической полировки линз во время финишной обработки при щадящем режиме не превышает 10...15 нм/мин, хотя в отдельных случаях она достигает 60 нм/мин (см. выше: Мартынов М.И., Михнев Р.А., Семенов А.П., Штандель С.К., ... Том II, стр.32).

Таблица	
Параметр	Полировка ситаловой подложки пучком ионов аргона
Вид фокусировки	Коническими стенками ускоряющего канала и внешним магнитным полем
Средний диаметр ускоряющего канала $D$ , мм	100
Сила тока ионного пучка $I_f$ , А	0,09
Средняя плотность ионного тока на подложке $j_f$ , а/м <sup>2</sup>	37
Ускоряющее напряжение $V$ , В	3000/1500
Плазмообразующий газ	Аргон
Время травления $t$ , мин.	10
Максимальная глубина выработки подложки $h_0$ , нм	1120
Максимальная скорость травления $\dot{h}_{\max}$ , нм/мин	112
Диаметр сечения ионного пучка на подложке, мм	35
Форма обработки мишени	Вытравлен круг с удалением материала из центральной части

Пример обработки поверхности сфокусированным ионным пучком.

Фокусировку пучка ионов аргона проводили при силе тока  $I_f=0,09$  А. Диаметр канала ускорителя устанавливают  $D=100$  мм, длину канала устанавливают  $L=4$  мм. Ускоряющее напряжение между анодом и деталью подавали от источника постоянного тока равным  $V=1300$  В, индукцию магнитного поля в канале устанавливают  $B_f=0,13$  Тл, индукцию внешнего фокусирующего магнитного поля устанавливают  $B_f=0,07$  Тл. Угол схождения пучка  $\beta$  равнялся примерно  $3^\circ$ . В результате данных действий азимутальный угол  $\alpha$  был приведен от примерно  $2,5^\circ$  к нулю, тем самым формируя ионный пучок с непрерывным однородным заполнением ионами его внутреннего объема. Таким образом, предлагаемый способ обеспечивает то, чтобы поперечное сечение ионного пучка на поверхности обрабатываемой детали приняло форму круга.

#### Формула изобретения

Способ электромагнитной фокусировки ионного пучка в ускорителе плазмы с

азимутальным дрейфом электронов, характеризующийся тем, что в указанном ускорителе, содержащем кольцевой ускоряющий канал, объем канала пронизан радиальным магнитным полем, стенки канала выполнены в форме двух коаксиальных усеченных конусов, образующие которых имеют заданный угол схождения  $\beta$ ,  
 5 ускоритель оборудован внешней системой магнитной фокусировки пучка, работающей на постоянных магнитах или на электромагнитах, при этом угол  $\alpha$  азимутального отклонения ионов, полученный ими в ускоряющем канале, приводят к нулю с помощью внешнего фокусирующего магнитного поля  $\vec{B}_f$ , которое создают  
 10 внешней системой магнитной фокусировки пучка, величину и направление вектора магнитной индукции  $\vec{B}_f$  устанавливают по формуле:

$$\vec{B}_f = -\frac{L}{l} \vec{B}_r,$$

15 где  $L$  - длина ускоряющего канала ускорителя плазмы, м;  
 $\vec{B}_r$  - вектор индукции радиального магнитного поля в ускоряющем канале, Тл;  
 $l$  - протяженность зоны действия, м, фокусирующего поля  $\vec{B}_f$ , Тл, на траекторию иона вне ускоряющего канала.

20

25

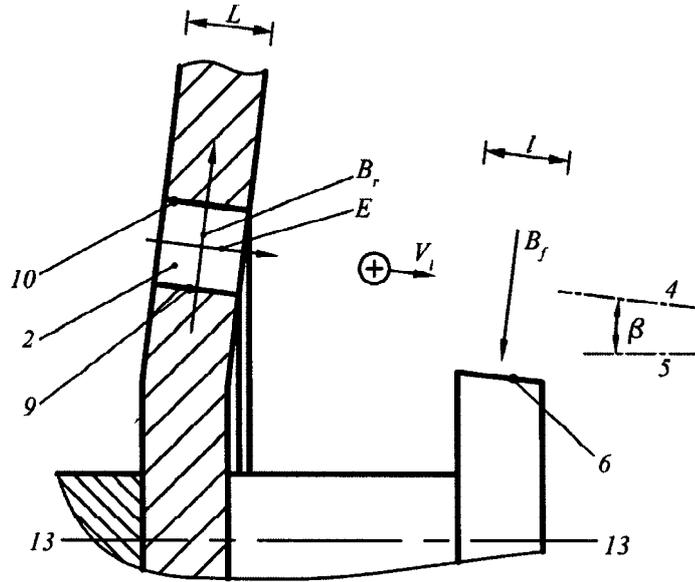
30

35

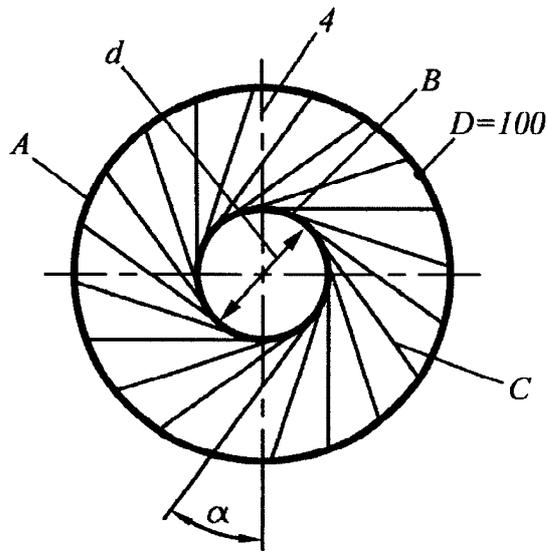
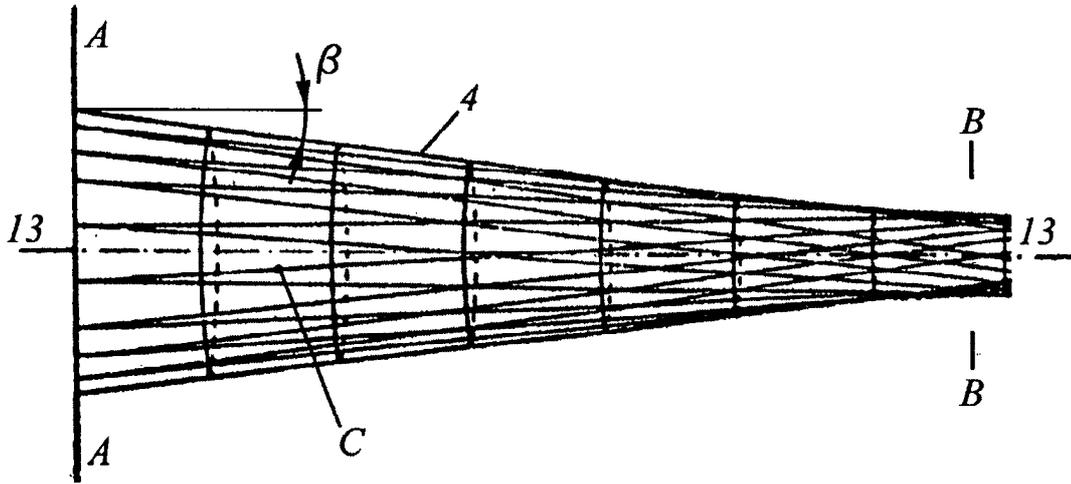
40

45

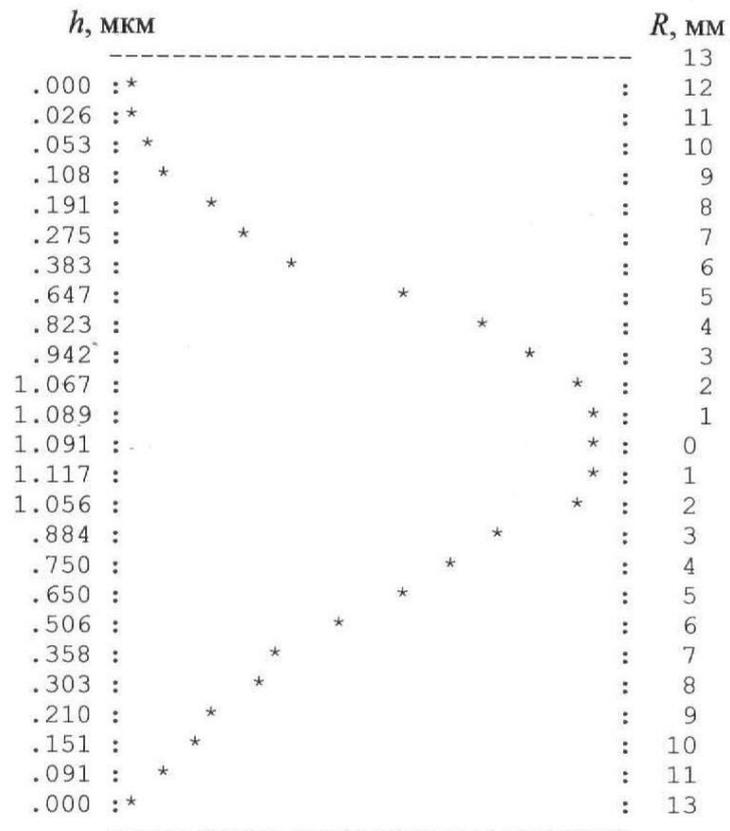
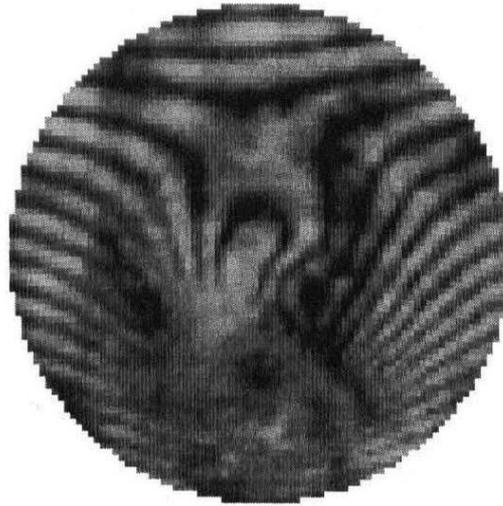
50



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4