



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ(21)(22) Заявка: **2010153835/07, 27.12.2010**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
27.12.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **27.12.2010**(45) Опубликовано: **20.08.2012** Бюл. № 23(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **US 4635282 A, 06.01.1987. RU 2252496 C2, 31.07.2002. DE 10151080 C1, 05.12.2002. US 2008023657 A1, 31.01.2008. US 4771447 A, 13.09.1988. RU 2206186 C2, 04.07.2000.**

Адрес для переписки:

**634055, г.Томск, пр. Академический, 2/3,
Институт сильноточной электроники СО
РАН**

(72) Автор(ы):

Федюнин Анатолий Васильевич (RU)

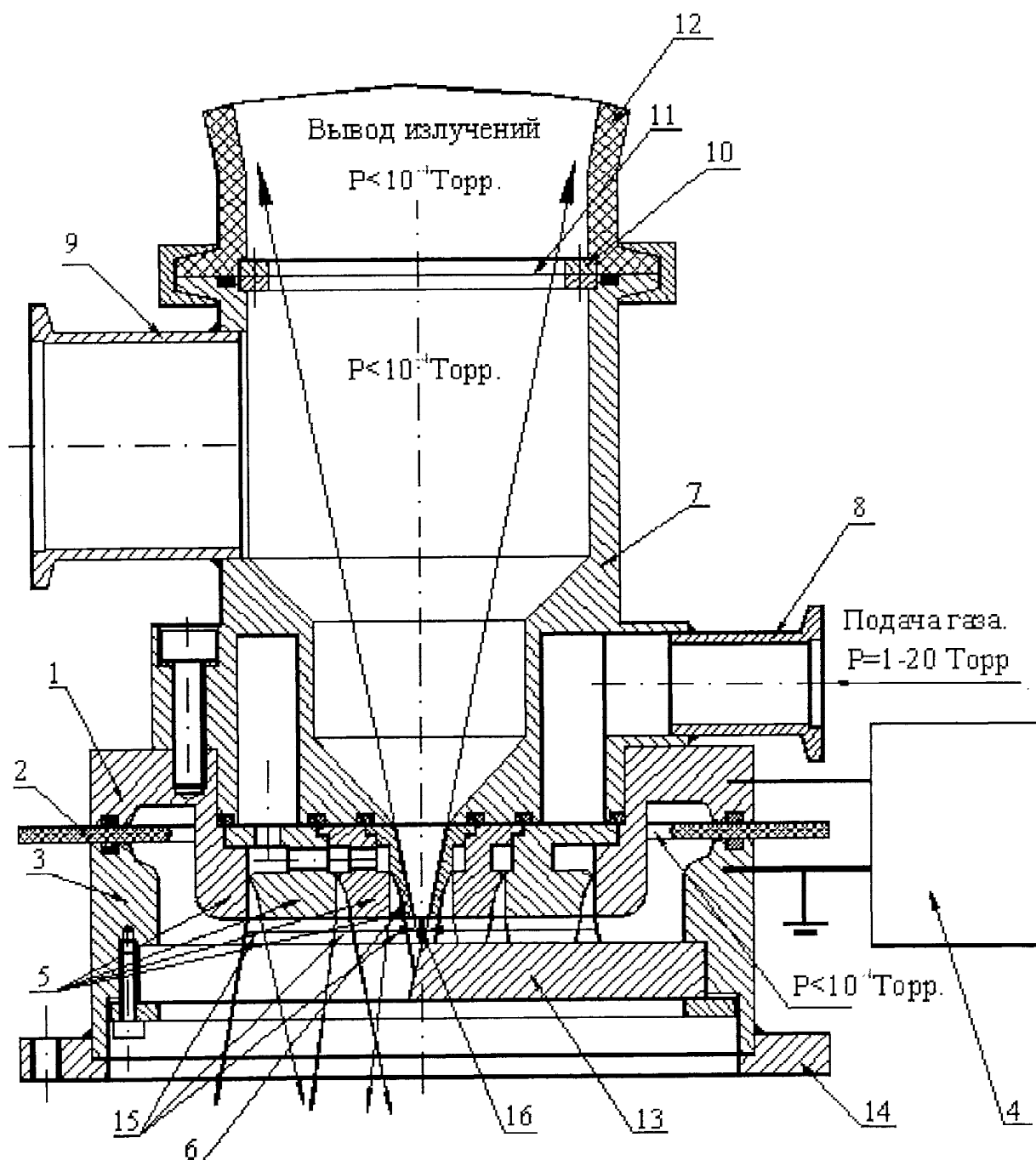
(73) Патентообладатель(и):

**Учреждение Российской академии наук
Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения РАН (ИСЭ СО РАН)
(RU)****(54) СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ЛАЙНЕРНОГО ТИПА**

(57) Реферат:

Использование: для фотолитографии и рентгеновской микроскопии. В вакуумную разрядную камеру подается рабочий плазмообразующий газ через несколько осесимметричных кольцевых сопел (5), образующих полые газовые цилиндры (15) (каскадированный газовый лайнер), в центре внутреннего кольцевого сопла высоковольтного электрода устроен канал для вывода излучения в виде конуса. При включении сильноточного импульсного генератора (4) происходит пробой внешней оболочки каскадированного лайнера (15). Нарастающий сильноточный разряд ионизирует преимущественно наружный слой внешней газовой оболочки, и под воздействием магнитного давления плазма начинает ускоренно двигаться к оси лайнера, ионизируя и вовлекая в движение внутренние оболочки.

Рэлей-Тейлоровские неустойчивости, возникающие при движении внешних цилиндрических оболочек к оси, гасятся при столкновении с неподвижными внутренними оболочками. Ионы сталкиваются на оси вакуумной разрядной камеры при скорости 100-500 км/сек. Кинетическая энергия плазмы переходит в тепловую энергию, на оси вакуумной разрядной камеры образуется столб горячей плазмы (16) с температурой, достаточной для многократной ионизации атомов газа. При рекомбинации атомов происходит генерация мягкого рентгеновского излучения. Технический результат: повышение средней мощности излучения и увеличение эффективности преобразования запасенной энергии генератора в энергию мягкого рентгеновского излучения. 2 н. и 2 з.п. ф-лы, 1 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
H05G 2/00 (2006.01)
H01J 35/22 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2010153835/07, 27.12.2010**

(24) Effective date for property rights:
27.12.2010

Priority:

(22) Date of filing: **27.12.2010**

(45) Date of publication: **20.08.2012 Bull. 23**

Mail address:

**634055, g.Tomsk, pr. Akademicheskij, 2/3,
Institut sil'notochnoj ehlektroniki SO RAN**

(72) Inventor(s):

Fedjunin Anatolij Vasil'evich (RU)

(73) Proprietor(s):

**Uchrezhdenie Rossijskoj akademii nauk Institut
sil'notochnoj ehlektroniki Sibirskogo otdelenija
RAN (ISEh SO RAN) (RU)**

(54) **METHOD AND APPARATUS FOR GENERATING SOFT X-RAY RADIATION FROM LINER-TYPE GAS DISCHARGE PLASMA**

(57) Abstract:

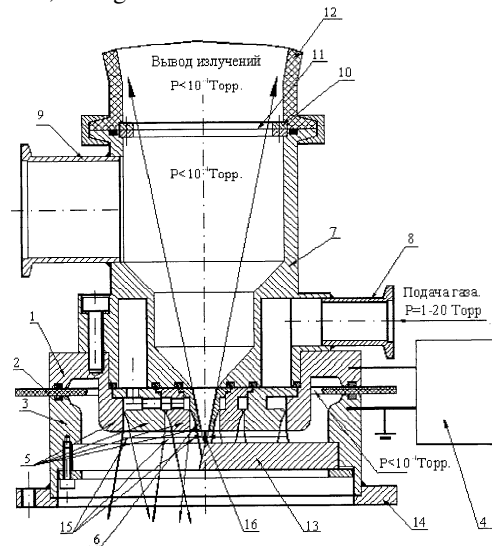
FIELD: physics.

SUBSTANCE: working plasma-forming gas is fed into a vacuum discharge chamber via a plurality of axially symmetrical annular nozzles (5), which form hollow gas cylinders (15) (cascade gas liner), a radiation outlet conduit in form of a cone being provided in the centre of the inner annular nozzle of a high voltage electrode. The outer shell of the cascade liner (15) is ruptured by a pulse from a high-current generator (4). The increasing high-current discharge ionises primarily the outer layer of the outer gas shell and, under the effect of magnetic pressure, the plasma begins to accelerate towards the axis of the liner, ionising the inner shells and setting them in motion. The Rayleigh-Taylor instabilities arising as the outer cylindrical shells move towards the axis are cancelled upon collision with the immobile inner shells. The ions collide on the axis of the vacuum discharge chamber at a speed of 100-500 km/s. The kinetic energy of the plasma turns into thermal energy and a column of hot plasma (16) with a temperature sufficient for the multiple ionisation of gas atoms is formed on the axis of the

vacuum discharge chamber. When the atoms recombine, soft X-ray radiation is generated.

EFFECT: increase in mean radiation power and increase in efficiency of converting stored energy of a generator into soft X-ray radiation energy.

4 cl, 1 dwg



Фиг. 1

RU 2 459 393 C1

RU 2 459 393 C1

Группа изобретений относится к технике мягкого рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 0.4-20 нм из плотной горячей плазмы сильноточного газового разряда лайнерного типа. Область применения включает литографию и рентгеновскую микроскопию.

Известны способ и устройство для получения коротковолнового излучения из плазмы сплошного цилиндрического Z-пинча [1, 2], где плазмообразующий газ ксенон подается по оси разрядной камеры, небольшой объем газа предварительно ионизируется излучением от разряда по поверхности изолятора внутри подающей газ трубки или от небольшого импульсного лазера. Начальный диаметр токового канала составляет несколько миллиметров, под воздействием магнитного поля токовый канал начинает сжиматься по направлению к оси симметрии системы. Движение плазменной оболочки неустойчиво, возникают сложные конфигурации в виде перетяжек цилиндрического токового канала (Релей-Тейлоровские неустойчивости). В центре перетяжки возникают горячие точки плазмы, размером несколько микрометров и температурой более 100 эВ ($1 \text{ эВ} \approx 11600^\circ\text{K}$). При такой температуре происходит 20-22-кратная ионизация атомов (для ксенона) и возбуждение внутренних электронных слоев. При рекомбинации ионов происходит испускание рентгеновских квантов, длины волн которых зависят от степени ионизации и атомного номера плазмообразующего газа.

Недостатком этого способа и устройства является наличие горячих точек, определяющих низкий КПД преобразования энергии сильноточного генератора в рентгеновское излучение (около 0.5%) с требуемой для потребителя длиной волны 13.5 нм. Для рентгеновского излучения с такой длиной волны оптимальной температурой для ксенона является 28 эВ, а при увеличении температуры происходит перераспределение энергии в более коротковолновую область спектрального диапазона. Кроме того, особенностью горячих точек является ограниченный выход из них мягкого рентгеновского излучения порядка 1-3 Дж/имп. в диапазоне длин волн 0.4-20 нм.

Указанные недостатки были устранены в источнике для генерации мягкого рентгеновского излучения, взятом нами за прототип, как наиболее близкий по технической сущности [3]. В данном источнике мягкого рентгеновского излучения реализован способ, основанный на пробое сильноточным разрядом полого газового цилиндра (газового лайнера), образующегося при подаче плазмообразующего газа в вакуумную камеру через одно кольцевое сопло, с последующей ионизацией, ускоренным движением ионов к оси лайнера, достижении ими скорости 100-500 км/сек, столкновением ионов на оси газового цилиндра, разогреве плазмы до температуры многократной ионизации с возбуждением внутренних электронных слоев и последующей рекомбинацией ионов, приводящей к испусканию квантов мягкого рентгеновского излучения.

Преимуществом данного способа по сравнению с аналогами [1, 2] является то, что в финальной стадии при 10-15-кратном сжатии от начального диаметра лайнера образуется столб горячей плазмы, а не горячие точки, что дает возможность получать импульсы мягкого рентгеновского излучения большой мощности и энергии, а также задавать конечную температуру горячей плазмы, изменяя такие параметры, как начальный диаметр, линейная масса лайнера, амплитуда и фронт нарастания импульса тока генератора.

Недостатками прототипа является сложность увеличения выхода мягкого рентгеновского излучения из-за развивающихся в процессе сжатия лайнера Рэлей-

Тейлоровских неустойчивостей, приводящих к тому, что при 15-20-кратном сжатии лайнера он распадается на отдельные фрагменты и переходит в режим образования горячих точек.

5 Кроме того, в прототипе, как и в других известных газоразрядных излучателях [1, 2], происходит повреждение ультратонких рентгеновских фильтров и элементов
оборудования потребителя, таких как рентгеновская оптика. Это происходит
вследствие того, что вывод мягкого рентгеновского излучения в этих источниках
10 производится по оси лайнера в сторону движения рабочего плазмообразующего газа,
и при сильноточном разряде через газ проходят ударные волны и специфические
эрозионные токовые каналы (по "длинным путям"), повреждающие элементы
рентгеновской оптики и ультратонкие фильтры. При этом способе вывода излучения
плазмообразующий газ интенсивно поглощает мягкое рентгеновское излучение
15 собственных ионов в резонансном режиме, увеличивая потери рентгеновского
излучения.

Задачей, на решение которой направлена заявляемая группа изобретений, является
повышение эффективности преобразования запасенной энергии генератора в энергию
мягкого рентгеновского излучения при значительном увеличении времени жизни
20 дорогостоящих ультратонких рентгеновских фильтров и элементов оборудования
потребителей.

Указанная задача осуществляется усовершенствованием известного способа
генерации мягкого рентгеновского излучения из плазмы газового разряда лайнерного
25 типа, заключающемся в формировании полого газового цилиндра (лайнера) путем
подачи плазмообразующего газа в вакуумируемый межэлектродный промежуток
через кольцевое сопло высоковольтного электрода, пробое газа сильноточным
разрядом с последующей ионизацией газа, электродинамическом сжатии
ионизированного газа с ускорением его до скоростей 100-500 км/сек, столкновении
30 атомов на оси газового цилиндра, разогреве плазмы до температуры многократной
ионизации с возбуждением внутренних электронных слоев, последующей
рекомбинацией ионов, приводящей к генерации мягкого рентгеновского излучения, и
выводе этого излучения.

Усовершенствование способа состоит в том, что плазмообразующий газ подается в
35 вакуумируемый межэлектродный промежуток через систему осесимметричных
кольцевых сопел, образуя многослойный (каскадированный) газовый лайнер, а вывод
излучения осуществляется через конусный канал внутреннего кольцевого сопла
высоковольтного электрода.

40 Усовершенствование способа также состоит в том, что в направляющем выводном
канале, выполненном в виде конуса, и узле вывода излучения поддерживается
давление менее 10^{-4} Торр.

Указанная задача осуществляется усовершенствованием известного устройства
генерации мягкого рентгеновского излучения из плазмы газового разряда лайнерного
45 типа, содержащего вакуумную разрядную камеру с осесимметрично расположенными
высоковольтным и заземленным электродами, подсоединенными к сильноточному
импульсному генератору. Высоковольтный электрод имеет кольцевое сопло для
напуска плазмообразующего газа, формирующее полый газовый цилиндр (лайнер) в
50 межэлектродном промежутке. Узел для вывода излучения устроен в заземленном
электроде и расположен по его оси.

Усовершенствование устройства состоит в том, что в высоковольтном электроде
устроено, по крайней мере, два или три осесимметричных кольцевых сопла,

формирующих многослойный (каскадированный) газовый лайнер. А узел вывода излучения устроен в высоковольтном электроде. Для чего в высоковольтном электроде для прохода излучения в центре внутреннего кольцевого сопла выполнен конусный направляющий канал, обращенный основанием на окно вывода мягкого рентгеновского излучения.

Усовершенствование устройства также состоит в том, что общий объем конусного отверстия и узла вывода мягкого рентгеновского излучения подсоединены к системе вакуумирования.

Применение каскадированного лайнера в заявляемом способе и устройстве позволило в значительной мере подавить Релей-Тейлоровские неустойчивости, возникающие при сжатии лайнера, что привело к увеличению финальной скорости и степени сжатия лайнера и, как следствие этого, значительно повысило долю энергии импульса сильноточного генератора, вложенную в кинетическую энергию плазмы (максимальный энерговыход происходит на конечном этапе сжатия лайнера).

Перенос канала вывода излучения из основного потока плазмообразующего газа в зону остаточного потока конусного канала при дополнительной откачке газа до давления менее 10^{-4} Торр из этого канала позволил уменьшить поглощение излучения плазмообразующим газом и предотвратить прохождение в нем ударных волн и эрозийных разрядов.

Плазмообразующий газ при непрерывном истечении в вакуумную камеру из сопла создает облако в направлении своего движения, интегральная масса которого равна 3-5 линейным массам газового лайнера. При линейной массе ксенонового лайнера 2 мкг/см² с начальным диаметром 1 см интегральная масса плазмообразующего газа по направлению движения составит 6-10 мкг/см² или около 60-100 нм эквивалентного фильтра, выполненного из материала, интенсивно поглощающего излучение с длиной волны 13.5 нм в резонансном режиме. В сторону, противоположную направлению истечения газа, уходит 1-5% от всей массы истекающего газа, что определяется конструкцией сопла, соотношением площади среза сопла и критического сечения. Следовательно, максимальная эквивалентная интегральная толщина поглощающего газа в конусном канале вывода излучения составит максимум 5 нм, что приемлемо для любого материала фильтра, даже в случае резонансного поглощения. Кроме того, при давлении менее 10^{-4} Торр не проходят ударные волны, а при установке ультратонкого фильтра в узле вывода излучения исключается возникновение длинноходовых эрозийных разрядов, так как фильтр, узел вывода излучения и высоковольтный электрод находятся под одним потенциалом.

Заявленный способ и устройство поясняется прилагаемым чертежом.

На фиг.1 схематично изображено устройство генерации мягкого рентгеновского излучения из плазмы газового разряда лайнерного типа.

Устройство содержит вакуумную разрядную камеру, состоящую из осесимметрично расположенных высоковольтного электрода 1, разделительного изолятора 2 и заземленного электрода 3. К высоковольтному электроду 1 и заземленному электроду подсоединен импульсный сильноточный генератор 4. В высоковольтном электроде 1 установлены три осесимметричных кольцевых сопла 5, по оси высоковольтного электрода 1 расположен центральный вкладыш внутреннего кольцевого сопла 6, в котором имеется конусное отверстие, направленное основанием конуса на узел вывода излучения 7, в нем устроен парубок подачи рабочего газа 8, патрубков вакуумной системы 9 и окно для вывода излучения 10 с ультратонким фильтром 11. Для подключения устройства к потребляющему излучение оборудованию потребителя

установлен изолирующий переходник 12. В заземленном электроде 3 установлен сменный лучевой электрод 13, осесимметричный с высоковольтным электродом 1 и прозрачный для газового потока, к заземленному электроду 3 присоединен фланец 14 для стыковки с турбомолекулярным вакуумным насосом большой

производительности. Способ генерации мягкого рентгеновского излучения из плазмы газового разряда лайнерного типа реализуют следующим образом.

В вакуумной разрядной камере и узле вывода излучения 7 поддерживается давление менее 10^{-4} Торр, через патрубок 8 в систему кольцевых сопел 5 под давлением 1-20 Торр непрерывно подается рабочий плазмообразующий газ, который образует несколько осесимметричных полых газовых цилиндров 15 (каскадированный газовый лайнер), газ проходит через лучевой электрод 13 и непрерывно откачивается высокопроизводительным турбомолекулярным вакуумным насосом, при этом в месте стыковки высоковольтного электрода 1, изолятора 2 и заземленного электрода 3 поддерживается давление ниже 10^{-4} Торр. При включении сильноточного импульсного генератора 4 происходит пробой внешней оболочки каскадированного лайнера 15, так как давление в ней составляет $1-10^{-1}$ Торр (в левой части кривой Пашена). Нарастающий сильноточный разряд ионизирует преимущественно наружный слой внешней газовой оболочки, и под воздействием магнитного давления плазма начинает ускоренно двигаться к оси лайнера. Рэлей-Тейлоровские неустойчивости, возникающие при движении внешней цилиндрической оболочки к оси, гасятся при столкновении с неподвижной средней оболочкой. Плазменная наружная оболочка и присоединившаяся к ней средняя оболочка продолжают ускоренное движение, совершая цикл развития неустойчивостей и их гашения на внутренней оболочке [4]. При соответствующих параметрах линейной массы оболочек лайнера, амплитуды и времени нарастания тока ионы сталкиваются на оси вакуумной разрядной камеры при скорости 100-500 км/сек. Кинетическая энергия плазмы переходит в тепловую энергию, на оси вакуумной разрядной камеры образуется столб горячей плазмы 16 с температурой, достаточной для многократной ионизации атомов газа. При рекомбинации атомов происходит генерация мягкого рентгеновского излучения, длина волны которого зависит от степени ионизации и атомного номера рабочего газа. Излучение выводится через конусное отверстие во внутреннем кольцевом сопле 6. В выводной конус попадает незначительная часть рабочего газа, которая постоянно откачивается через патрубок вакуумной системы 9, обеспечивая давление менее 10^{-4} Торр, тем самым исключая резонансное поглощение излучения рабочим газом. К потребляющему оборудованию мягкое рентгеновское излучение проходит через окно 10, с установленным в нем ультратонким фильтром 11. Узел вывода излучения 7 отделен от оборудования потребителей изолирующим переходником 12, так как он находится в контакте с высоковольтным электродом 1 и периодически находится под напряжением от сильноточного генератора 4.

Данный способ и устройство были осуществлены на экспериментальных установках ИМРИ-3 и ИМРИ-7. На ИМРИ-3 впервые был применен трехкаскадный лайнер, было достигнуто 100-кратное сжатие (от наружного диаметра лайнера до финального диаметра высокотемпературного плазменного столба) и получено четырехкратное увеличение выхода мягкого рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1-20 нм для ксенонового лайнера. Энергия для однослойного лайнера составила 150 Дж/имп., а для трехслойного лайнера - 600 Дж/имп., тогда при запасенной энергии в конденсаторах сильноточного генератора 2.4 кДж кпд

трехслойного лайнера составил 25%. В экспериментальной установке ИМРИ-7 применялся фильтр из нитроцеллюлозы толщиной 50 нм, расположенный на расстоянии 15 см от сжатой горячей плазмы по оси лайнера за высоковольтным электродом. При энергии импульса мягкого рентгеновского излучения 15 Дж фильтр из нитроцеллюлозы оставался целым после 50 импульсов. Аналогичный тестовый фильтр, расположенный на расстоянии 50 см от точки сжатия по оси лайнера за заземленным электродом, разрушался при первом импульсе.

Источники информации

1. Патент RU 2252496 C2, 20.05.2005, ПК H05G 2/00.
2. Патент US 7642533 B2 от 05/01/2010, МПК H01J 35/20.
3. Патент US 4635282, 06.01.1987, МПК G21K 5/00.
4. Р.Б.Бакшт, В.И. Орешкин, А.В. Федюнин и др. "Рэлей-Тейлоровская неустойчивость и выход К-излучения при сжатии газовых лайнеров" - Физика плазмы, т.21, №11, 1995, с.959-965.

Формула изобретения

1. Способ генерации мягкого рентгеновского излучения из плазмы газового разряда лайнерного типа, заключающийся в формировании полого газового цилиндра (лайнера) путем подачи плазмообразующего газа в вакуумируемый межэлектродный промежуток через кольцевое сопло высоковольтного электрода, пробое газа сильноточным разрядом с последующей ионизацией газа, электродинамическом сжатии ионизированного газа с ускорением его до скоростей 100-500 км/с, столкновением атомов на оси газового цилиндра, разогреве плазмы до температуры многократной ионизации с возбуждением внутренних электронных слоев, последующей рекомбинацией ионов, приводящей к генерации мягкого рентгеновского излучения и выводе этого излучения, отличающийся тем, что плазмообразующий газ подается через осесимметричные кольцевые сопла, образуя многослойный (каскадированный) газовый лайнер, а вывод излучения осуществляется через конусный канал внутреннего кольцевого сопла высоковольтного электрода.

2. Способ генерации мягкого рентгеновского излучения из плазмы газового разряда лайнерного типа по п.1, отличающийся тем, что в выводном конусном канале и узле вывода излучения поддерживается давление менее 10^{-4} Торр.

3. Устройство генерации мягкого рентгеновского излучения из плазмы газового разряда лайнерного типа, содержащее вакуумную разрядную камеру с осесимметрично расположенными высоковольтным и заземленным электродами и сильноточный импульсный генератор, при этом высоковольтный электрод имеет кольцевое сопло для напуска плазмообразующего газа, формирующее газовый лайнер в межэлектродном промежутке, а в электроде устроено окно вывода излучения, отличающееся тем, что в высоковольтном электроде устроены, по крайней мере, два или три осесимметричных кольцевых сопла, формирующие каскадированный газовый лайнер, а окно вывода излучения устроено в высоковольтном электроде.

4. Устройство генерации мягкого рентгеновского излучения из плазмы газового разряда лайнерного типа по п.3, отличающееся тем, что в центре внутреннего кольцевого сопла высоковольтного электрода устроен канал для вывода излучения в виде конуса, обращенный основанием на окно вывода мягкого рентгеновского излучения.