



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*H05H 3/06 (2024.01); G21B 1/19 (2024.01)*

(21)(22) Заявка: 2020124384, 23.07.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
23.07.2020

Дата регистрации:  
02.09.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.07.2020

(43) Дата публикации заявки: 26.01.2022 Бюл. № 3

(45) Опубликовано: 02.09.2024 Бюл. № 25

Адрес для переписки:

129090, Москва, ул. Б. Спасская, 25, стр. 3, ООО  
"Юридическая фирма Городисский и  
Партнеры"

(72) Автор(ы):

Таскаев Сергей Юрьевич (RU),  
Макаров Александр Николаевич (RU),  
Соколова Евгения Олеговна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

ТАЭ ТЕКНОЛОДЖИЗ, ИНК. (US)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: US 2011091000 A1, 21.04.2011.

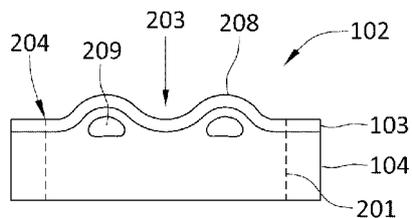
С.Ю.Таскаев, В.В.Каныгин, Бор-  
нейтронозахватная терапия, Новосибирск,  
Издательство сибирского отделения  
Российской академии наук, 2016, с. 22, 36-41,  
52, 69-73, 81. Б.Ф.Баянов, В.П.Белов,  
С.Ю.Таскаев, Нейтроногенерирующая мишень  
ускорительного источника нейтронов для  
нейтронозахватной терапии, ИЯФ 2005-4,  
(см. прод.)

## (54) СИСТЕМЫ, УСТРОЙСТВА И СПОСОБЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И СТОЙКОСТИ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛАХ

(57) Реферат:

Использование: для снижения деформации и стойкости в металлических телах, имеющих слой лития и металлическую подложку. Сущность изобретения заключается в том, что осуществляют воздействие на мишень излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и в мишени образуется множество пузырей и затем осуществляют воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и между слоем лития и металлической подложкой образуется слой соединения лития до размера,

достаточного для уменьшения множества пузырей в количестве и/или размере, путем воздействия на мишень при флюенсе протонов по меньшей мере  $0,5 \times 10^{19}$  на квадратный сантиметр ( $\text{см}^{-2}$ ). Технический результат: обеспечение возможности снижения вероятности образования пузырей и/или уменьшения размеров пузырей, уже образовавшихся в металлических телах, имеющих слой лития и металлическую подложку, подвергнутых воздействию излучения заряженных частиц, 2 н. и 28 з.п. ф-лы, 41 ил., 2 табл.



**Фиг. 2D**

(56) (продолжение):

Новосибирск, 2005, с. 3-5, 8, 19-21. [http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/neutr\\_gen/index.html](http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/neutr_gen/index.html). RU 2326513 С2 (РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР - ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ. АКАД. Е.И. ЗАБАБАХИНА (РФЯЦ-ВНИИТФ и др.), 10.06.2008, описание: стр. 6; фиг. 1. Михайлов Антон Михайлович, Модификация поверхности литиевой мишени при воздействии протонного пучка с энергией 2 МэВ, Выпускная квалификационная работа, Новосибирск, 2019, с. 5, 6, 9, 18, 26.

RU 2825858 С2

RU 2825858 С2



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*H05H 3/06* (2006.01)  
*G21B 1/19* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*H05H 3/06 (2024.01); G21B 1/19 (2024.01)*

(21)(22) Application: **2020124384, 23.07.2020**

(24) Effective date for property rights:  
**23.07.2020**

Registration date:  
**02.09.2024**

Priority:

(22) Date of filing: **23.07.2020**

(43) Application published: **26.01.2022** Bull. № 3

(45) Date of publication: **02.09.2024** Bull. № 25

Mail address:

**129090, Moskva, ul. B. Spasskaya, 25, str. 3, OOO  
"Yuridicheskaya firma Gorodisskij i Partnery"**

(72) Inventor(s):

**Taskaev Sergej Yurevich (RU),  
Makarov Aleksandr Nikolaevich (RU),  
Sokolova Evgeniya Olegovna (RU)**

(73) Proprietor(s):

**TAE TECHNOLOGIES, INC. (US)**

(54) **SYSTEMS, DEVICES AND METHODS FOR REDUCTION OF DEFORMATION AND RESISTANCE IN METAL BODIES**

(57) Abstract:

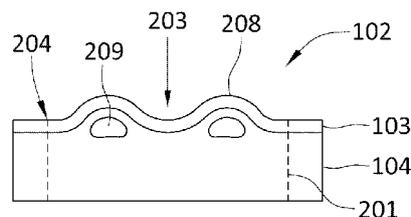
FIELD: chemistry.

SUBSTANCE: use to reduce deformation and resistance in metal bodies having a lithium layer and a metal substrate. Essence of the invention consists in the fact that the target is exposed to radiation of charged particles so that the target emits neutrons and multiple bubbles are formed in the target and then the target is exposed to additional radiation of charged particles so that the target emits neutrons and between the lithium layer and a metal substrate, a lithium compound layer

is formed to a size sufficient to reduce a plurality of bubbles in an amount and/or size, by acting on the target with proton fluence of at least  $0.5 \times 10^{19}$  per square centimetre (cm<sup>-2</sup>).

EFFECT: possibility of reducing the probability of formation of bubbles and/or reducing the size of bubbles already formed in metal bodies having a lithium layer and a metal substrate, which are exposed to radiation of charged particles.

30 cl, 41 dwg, 2 tbl



**Фиг. 2D**

## ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

[1] Описываемое здесь изобретение относится, в общем, к системам, устройствам и способам для снижения вероятности образования деформации и/или для уменьшения размера деформаций в металлических телах.

### 5 ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[2] Имеется множество применений, где металлические тела помещены в среды, подвергаемые воздействию относительно больших величин излучения заряженных частиц. Примеры этих применений включают медицинские лечение (например, рака) и диагностику, ядерный синтез, космические технологии, производство изотопов, обнаружение опасных материалов, анализ образцов руд драгоценных металлов, визуализацию и другие.

[3] Воздействие достаточной величиной излучения заряженных частиц может заставлять некоторые типы металлических тел переходить в потенциально деградирующее состояние, при котором излучение вызывает генерацию деформаций в теле. Эти деформации часто принимают форму пузырей (вздутий), и приводящее к этому состояние обычно называется пузырением (вспучиванием). Пузырение может быть вызвано образованием молекулярного газообразного водорода в этих металлических телах. Газообразный водород может образовываться по мере того, как излучение заряженных частиц, такое как протонное излучение, рекомбинирует с электронами металла, образуя молекулярный газообразный водород. Этот газ может скапливаться в каверне (например, зарождающемся пузырьке) в металлическом теле. Продолжающееся облучение излучением может давать дополнительный водород, который вызывает рост газовой каверны и, возможно, проявляется как пузырь (например, трещина, вздутие, расслаивание и/или другая деформация) на или вблизи поверхности металлического тела. Этот вид пузырения обычно чаще характерен для тех металлов, которые плохо растворяют водород (например, медь, алюминий, молибден, железо, серебро, вольфрам, платина и золото), чем для металлов, которые хорошо растворяют водород (например, щелочные, щелочноземельные металлы, титан, тантал, ниобий, ванадий, никель и палладий). (См., например, Бадрутдинов и др. (Badrutdinov et al.), In Situ Observations of Blistering of a Metal Irradiated with 2-MeV Protons, Metals 2017, 7, 558.)

[4] Деформация материала, вызванная такими пузырями, может быть значительной и, в зависимости от типа применения, может привести к проблемам. Как таковое, пузырение в общем рассматривается как нежелательный эффект облучения излучением заряженных частиц.

[5] Соответственно, существует потребность в системах, устройствах и способах с антидеформационными характеристиками, таких как те, которые устойчивы к образованию пузырей, снижают вероятность образования пузырей и/или уменьшают размер пузырей, уже образовавшихся в металлических телах, подвергнутых воздействию излучения заряженных частиц.

### 40 СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[6] Здесь приведены примерные варианты осуществления систем и устройств, проявляющих улучшенные антидеформационные характеристики при воздействии излучения заряженных частиц, и способов, порождающих такие характеристики в системах и устройствах. Эти антидеформационные характеристики могут включать повышенную стойкость к образованию деформаций или сниженную вероятность образования деформаций при воздействии такого излучения. Эти способы также включают в себя варианты осуществления, которые уменьшают размер уже

образовавшихся из-за воздействия излучения деформаций и которые могут уменьшить количество уже образовавшихся деформаций. Также приведены способы изготовления систем и устройств, проявляющих эти улучшенные антидеформационные характеристики, в качестве наших способов кондиционирования произведенных систем и устройств таким образом, чтобы они проявляли эти улучшенные характеристики. Примеры деформаций могут включать, но не ограничены ими, пузыри, вызываемые образованием газообразного водорода. Примеры преимуществ, обеспечиваемых вышеупомянутыми вариантами осуществления, могут включать предотвращение образования деформаций, снижение эффекта (например, залечивание или смягчение) уже образовавшихся деформаций, продление срока службы систем и устройств, подвергаемых воздействию излучения заряженных частиц, и прочие.

[7] Другие системы, устройства, способы, признаки и преимущества описанного здесь изобретения будут или станут очевидны специалисту в данной области техники после изучения следующих фигур и подробного описания. Подразумевается, что все такие дополнительные системы, способы, признаки и преимущества, включаемые в рамках настоящего описания, будут находиться в пределах объема описанного здесь объекта изобретения и будут охраняться приложенной формулой изобретения. Никким образом признаки примерных вариантов осуществления не должны истолковываться как ограничивающие приложенную формулу изобретения, если нет явного указания таких признаков в формуле изобретения.

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

[8] Подробности изложенного здесь изобретения, касающиеся как его конструкции, так и его работы, могут стать очевидными при изучении приложенных фигур, на которых подобные ссылочные позиции относятся к подобным частям. Компоненты на фигурах не обязательно представлены в масштабе, вместе этого акцент сделан на иллюстрации принципов изобретения. Более того, все иллюстрации предназначены для того, чтобы передать концепции, причем относительные размеры, формы и другие детальные атрибуты могут быть проиллюстрированы схематично, а не буквально или точно.

[9] Фиг. 1A-1D представляют собой виды в перспективе, изображающие примерные варианты осуществления металлического тела.

[10] Фиг. 1E представляет собой вид в разрезе, изображающий примерный вариант осуществления металлического тела, по линии 1E-1E на фиг. 1D.

[11] Фиг. 2A представляет собой вид в перспективе, изображающий примерный вариант осуществления металлического тела во время облучения излучением заряженных частиц в первый момент времени. Фиг. 2B представляет собой вид в разрезе, изображающий этот примерный вариант осуществления, по линии 2B-2B на фиг. 2A.

[12] Фиг. 2C представляет собой вид в перспективе, изображающий примерный вариант осуществления металлического тела во время облучения излучением заряженных частиц во второй момент времени. Фиг. 2D представляет собой вид в разрезе, изображающий этот примерный вариант осуществления, по линии 2D-2D на фиг. 2C.

[13] Фиг. 2E представляет собой вид в перспективе, изображающий примерный вариант осуществления металлического тела во время облучения излучением заряженных частиц в третий момент времени. Фиг. 2F представляет собой вид в разрезе, изображающий этот примерный вариант осуществления, по линии 2F-2F на фиг. 2E.

[14] Фиг. 2G и 2H представляют собой изображения, иллюстрирующие пример пузыря на поверхности крупнозернистой меди, соответственно до и после среза ионным пучком.

[15] Фиг. 3 представляет собой блок-схему последовательности операций, изображающую примерный вариант осуществления способа уменьшения пузырей в

металлическом теле.

[16] Фиг. 4А представляет собой вид в перспективе, изображающий примерный вариант осуществления металлического тела во время облучения излучением заряженных частиц в первый момент времени. Фиг. 4В представляет собой вид в разрезе, изображающий этот примерный вариант осуществления, по линии 4В-4В на фиг. 4А.

[17] Фиг. 4С представляет собой вид в перспективе, изображающий примерный вариант осуществления металлического тела во время облучения излучением заряженных частиц во второй момент времени. Фиг. 4D представляет собой вид в разрезе, изображающий этот примерный вариант осуществления, по линии 4D-4D на фиг. 4С.

[18] Фиг. 4Е представляет собой вид в разрезе, изображающий примерный вариант осуществления с частично образовавшимся слоем соединения.

[19] Фиг. 4F представляет собой вид в перспективе, изображающий примерный вариант осуществления металлического тела во время облучения излучением заряженных частиц в третий момент времени. Фиг. 4G представляет собой вид в разрезе, изображающий этот примерный вариант осуществления, по линии 4G-4G на фиг. 4F.

[20] Фиг. 5 представляет собой блок-схему последовательности операций, изображающую примерный вариант осуществления способа уменьшения пузырей в металлическом теле.

[21] Фиг. 6А представляет собой вид в разрезе, изображающий примерный вариант осуществления с частично образовавшейся аморфной областью и пузырьрем.

[22] Фиг. 6В представляет собой вид в разрезе, изображающий примерный вариант осуществления металлического тела с практически сформированной аморфной областью и с малым пузырением или без него.

[23] Фиг. 7 представляет собой блок-схему последовательности операций, изображающую примерный вариант осуществления способа уменьшения пузырей в металлическом теле.

[24] Фиг. 8А представляет собой схематичный вид, изображающий примерный вариант осуществления нейтронно-лучевой системы на основе ускорителя.

[25] Фиг. 8В представляет собой вид в перспективе, изображающий примерный вариант осуществления мишени, предназначенной для генерации нейтронов.

[26] Фиг. 8С представляет собой вид в разрезе варианта осуществления по линии 8С-8С на фиг. 8В.

[27] Фиг. 8D представляет собой вид в разрезе варианта осуществления со слоем соединения лития.

[28] Фиг. 8Е представляет собой другой вид в разрезе варианта осуществления с аморфной областью.

[29] Фиг. 8F и 8G представляют собой виды спереди примерного варианта осуществления мишени, показывающие соответственно ступенчатый и спиральный рисунки развертки пучка.

[30] Фиг. 9А-9С представляют собой блок-схемы последовательности операций, изображающие примерные варианты осуществления способов формирования пучка нейтронов с мишенью с антидеформационными полезными эффектами.

[31] Фиг. 10А-10С представляют собой графики, изображающие данные, собранные при экспериментальной проверке описанных здесь вариантов осуществления.

[32] Фиг. 11А-11С представляют собой изображения областей мишени после облучения пучком протонов.

#### ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

[33] Прежде чем предложенное изобретение будет описано подробно, следует

понимать, что данное раскрытие не ограничено описанными конкретными вариантами осуществления и может, разумеется, изменяться. Также следует понимать, что использованная здесь терминология предназначена только для описания конкретных вариантов осуществления и не предполагается ограничивающей, поскольку объем настоящего раскрытия будет ограничен только приложенной формулой изобретения.

[34] Металлические тела, которые являются объектом раскрытых здесь вариантов осуществления изобретения, могут быть использованы в любом из широкого диапазона применений (например, промышленных, коммерческих, исследовательских или иных) и, соответственно, могут иметь любые из широкого диапазона форм, размеров или конфигураций, которые удовлетворяют потребностям этих применений. Раскрытые здесь металлические тела включают в себя по меньшей мере слой лития и металлическую подложку. Металлическая подложка может главным образом состоять из одного

металлического элемента (например, медная подложка высокой чистоты), сплава двух или более металлических элементов, соединения одного или более металлических элементов с одним или более неметаллическими элементами или других. Примеры металлов для подложки 104 включают, но не ограничены ими: медь, алюминий, молибден, железо, серебро, палладий, тантал, углерод (например, фазы графита и алмаза), вольфрам, платину или золото. Слой лития может аналогично состоять главным образом из лития, может быть литиевым сплавом или соединением лития, или выполнен иным. Слой лития может быть в твердом или жидком виде. В описанных здесь вариантах осуществления в состав слоя лития может входить один или более изотопов лития.

Например, в описанных здесь вариантах осуществления в состав слоя лития может входить по меньшей мере 90% лития-7 ( ${}^7\text{Li}$ ), по меньшей мере 92% лития-7, по меньшей мере 95% лития-7, по меньшей мере 98% лития-7, по меньшей мере 99% лития-7, по меньшей мере 99,9% лития-7, и т.п. Остальное может составлять изотоп лития-6 ( ${}^6\text{Li}$ ), другой изотоп лития, примеси или другой элемент (например, как в соединении лития).

[35] Фиг. 1А-1С представляют собой виды в перспективе, изображающие примерные варианты осуществления металлического тела 102, имеющего слой 103 лития и металлическую подложку 104. Хотя слой 103 лития показан имеющим открытую поверхность (например, сверху на этих видах), слой 103 лития может также быть заделан в металлическое тело 102, так что он не образует самую внешнюю поверхность тела 102. Аналогичным образом, хотя подложка 104 показана как объемная (массивная) подложка, имеющая открытую поверхность (например, внизу), подложка 104 может также быть заделана в тело 102, так что она не образует самую внешнюю поверхность (например, путем включения других структур или материалов в тело 102).

[36] На фиг. 1А металлическое тело 102 имеет планарную или плоскую форму. На фиг. 1В металлическое тело 102 имеет вогнутую форму, обладающую кривизной в плоскости Y-Z, а на фиг. 1С металлическое тело 102 имеет выпуклую форму, обладающую кривизной в плоскости Y-Z. Вогнутая и выпуклая формы изображены с точки зрения читателя. Фиг. 1А-1С показывают некоторые базовые примеры форм и контуров поверхностей, которые характеризуют металлическое тело 102. Металлическое тело 102 может иметь более сложные формы и контуры поверхностей, включая такие, которые сочетают в себе две или более из форм и два или более из контуров поверхностей, изображенных на фиг. 1А-1С, или такие, которые являются иными и/или более сложными. Тела 102, показанные на фиг. 1А-1С, могут представлять всю физическую протяженность тела 102 или могут представлять часть или секцию еще более крупного металлического тела. Перечень примерных трехмерных форм тела 102 включает, но не ограничен ими: пластинку или пластину, тарелку, диск, брусок, куб

или его часть, прямоугольный параллелепипед или его часть, цилиндр или его часть, призму или ее часть, конус или его часть, пирамиду или ее часть, сферу или ее часть, тороид или его часть, полую камеру или ее часть или любую комбинацию двух или более из вышеуказанных, и другие.

5 [37] Фиг. 2А-2F изображают примерный вариант осуществления металлического тела 102, имеющего слой 103 лития на металлической подложке 104 или смежно с ней, во время различных стадий облучения излучением заряженных частиц. Хотя тело 102 изображено здесь как планарное (плоское), механизмы, описанные со ссылкой на эти фигуры, равным образом применимы ко всем конфигурациям форм и размеров тела  
10 102, обсуждаемым или предусмотренным здесь.

[38] Фиг. 2А представляет собой вид в перспективе, изображающий металлическое тело 102 с областью 201 поверхности 204 во время облучения излучением заряженных частиц в первый момент времени. Фиг. 2В представляет собой вид в разрезе, изображающий тело 102, по линии 2В-2В на фиг. 2А. Направление падения излучения  
15 заряженных частиц указано вектором 203, который в этом примере является нормальным к поверхности 204. В этом варианте осуществления флюенс (интегрированный по времени поток, причем поток указан в частицах на единицу площади на некоторый момент времени) является постоянным по области 201 (например, вся область 201  
20 поверхности одновременно подвергается воздействию равномерного распределения излучения заряженных частиц, или пучок излучения заряженных частиц, имеющий меньшую площадь сечения, чем площадь области 201, равномерно движется по области 201, как будет описано здесь далее). В этот первый момент времени, показанный на фиг. 2А и 2В, в металлическом теле 102 еще не возникло пузырение.

[39] Фиг. 2С представляет собой другой вид в перспективе, изображающий тело 102,  
25 а фиг. 2D – вид в разрезе, изображающий тело 102, по линии 2D-2D на фиг. 2С. Облучение области 201 дополнительным, пролонгированным излучением заряженных частиц привело в результате к образованию деформаций 208, которые в данном примере представляют собой пузыри. Визуальный внешний вид и механизм образования пузырей 208 могут варьироваться. В этом примере образование газовых каверн 209 в подложке  
30 104 деформировало окружающий материал, проявляясь как пузыри (например, отклонения в контуре поверхности, приподнятые поверхностные образования, вздутия, трещины и т.д.), видимые в области 201 поверхности 204.

[40] Порог пузырения (например, доза, при которой начинается пузырение) зависит от различных факторов, таких как тип металлической поверхности, температура образца  
35 при облучении, тип излучения (например, ионное, протонное), энергия излучения и другие. Предшествующие исследования, такие как Бадрутдинов и др. (Badrutdinov et al.), “In Situ Observations of Blistering of a Metal Irradiated with 2-MeV Protons” Metals 2017, 7, 558, отмечали, что порог пузырения поверхности меди зависит от чистоты меди и что чем чище медь, тем выше порог. В публикации Бадрутдинова отмечается, что при  
40 энергиях протонов в 2 мегаэлектронвольта (МэВ) максимальный порог для меди равен  $3 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ , а его минимальное значение может быть в семь раз ниже. Кроме того, размер пузырей на поверхности меди зависит от чистоты меди, причем чем чище медь, тем больше пузыри. Размеры пузырей меди, появляющихся в результате протонного излучения 2 МэВ, могут находиться в диапазоне от  $40 \pm 20$  микрон до  $160 \pm 50$  микрон.  
45 Фиг. 2G и 2H представляют собой изображения, иллюстрирующие пример пузыря на поверхности крупнозернистой меди с 99,99996%, до и после среза ионным лучом. Газовая каверна видна внутри срезанного пузыря на фиг. 2H.

[41] Фиг. 2Е представляет собой другой вид в перспективе, изображающий

металлическое тело 102, а фиг. 2F - вид в разрезе, изображающий тело 102, по линии 2F-2F на фиг. 2E. После образования пузырей 208 облучение области 201 дополнительным излучением заряженных частиц уменьшило или снизило размер пузырей 208. Фиг. 2F показывает, что объем газовых каверн 209 уменьшился по сравнению с 5 фиг. 2D, что, в свою очередь, уменьшило высоту пузырей 208 (фиг. 2F по сравнению с фиг. 2D) и площадь поверхности выступающих участков пузырей 208 (фиг. 2E по сравнению с фиг. 2C).

[42] Применение излучения заряженных частиц в этом варианте осуществления, по меньшей мере до точки, где начинается сокращение пузырей, приводит к металлическому 10 телу 102 с повышенной сопротивляемостью образованию пузырей. Когда излучение применяется после этой точки, пузыри 208 продолжают уменьшаться, и сопротивляемость образованию пузырей еще больше повышается. Таким образом, металлическое тело 102, подвергнутое процессу, описанному со ссылкой на фиг. 2A-2F, претерпевает некоторую форму доведения материала до требуемого состояния 15 (кондиционирования), которое увеличивает его стойкость к дальнейшему образованию пузырей.

[43] Фиг. 3 представляет собой блок-схему последовательности операций, изображающую примерный вариант осуществления способа 300 в соответствии с процессом, описанным со ссылкой на фиг. 2A-2F. На этапе 302 излучение заряженных 20 частиц подают к области металлического тела 102 (например, содержащей литий, как описано со ссылкой на фиг. 2A-2B). На этапе 304 было подано дополнительное излучение заряженных частиц так, что в упомянутой области образуются и растут в размере один или более пузырей (например, как описано со ссылкой на фиг. 2C-2D). На этапе 306 осуществляют дальнейшую подачу излучения заряженных частиц так, что один или 25 более пузырей уменьшаются в размере. Этап 306 может продолжаться до тех пор, пока сокращение размера пузырей по существу не останавливается, пока некоторые или все пузыри не исчезнут или непрерывно после исчезновения пузырей, в зависимости от применения. Интервал между этапами 304 и 306, в некоторых вариантах осуществления, может включать в себя фазу, на которой образование пузырей в упомянутой области 30 прекращается или по существу прекращается (или прекращается или по существу прекращается рост размера пузырей), но уменьшение размера пузырей еще не происходит. Дополнительное применение излучения заряженных частиц

[44] Слой 103 лития может находиться в непосредственном контакте с металлической подложкой 104, как изображено на фиг. 1A-1C. В некоторых описанных здесь вариантах 35 осуществления между слоем 103 лития и металлической подложкой 104 может образоваться или располагаться соединение. Фиг. 1D представляет собой вид в перспективе, изображающий планарное металлическое тело 102 со слоем 103 лития, металлической подложкой 104 и расположенным между 103 и 104 слоем 105 соединения лития-металла. Это соединение может включать в себя литий (из слоя 103) и один или 40 более металлов металлической подложки 104. Например, если подложкой 104 является медной, то слой 105 может быть соединением лития-меди (например, LiCu). Формирование этого слоя 105 соединения может быть вызвано взаимодействием тела 102 с самим излучением заряженных частиц, теплом, выделившимся от излучения заряженных частиц (или ядерными реакциями, индуцированными излучением), или 45 другими механизмами. В тех вариантах осуществления, где металлическая подложка 104 сама является слоистой структурой, слой 105 соединения лития может образовываться между слоем 103 лития и наиболее близким к нему слоем металлической подложки 104.

[45] Фиг. 1Е представляет собой вид в разрезе, изображающий этот примерный вариант осуществления, по линии 1Е-1Е на фиг. 1D. Как обозначено на фиг. 1Е, слой 103 лития имеет толщину 110, слой 105 соединения лития имеет толщину 112, а подложка 104 имеет толщину 114. Относительные толщины здесь приведены только в качестве примера. Хотя подложка 104 будет обычно самым толстым слоем в большинстве вариантов осуществления, это не требуется. Переход 120 между слоем 103 лития и слоем 105 соединения лития может быть резким или постепенным, как и переход 130 между слоем 105 соединения лития и подложкой 104.

[46] Фиг. 4А-4G изображают другой примерный вариант осуществления металлического тела 102 на различных стадиях облучения излучением заряженных частиц. Как и в вариантах осуществления по фиг. 2А-2F, тело 102 изображено здесь как планарное (плоское), но описанное со ссылками на эти фигуры изобретение равным образом применимо ко всем конфигурациям форм и размеров тела 102, обсужденным или предусмотренным здесь. Слой 105 соединения лития формируется в ходе последовательности операций, изображенных на фиг. 4А-4G. В этих вариантах осуществления (и тех, что показаны на фиг. 5 и 9В и т.д.), механизм, по которому происходит уменьшение размера пузырей и их исчезновение, заключается в образовании слоя соединения лития; однако описанные здесь варианты осуществления не ограничены этим (например, как демонстрируется вариантами осуществления по фиг. 3, 7, 9А и 9С), и объем изложенного здесь изобретения охватывает также и другие механизмы.

[47] Фиг. 4А представляет собой вид в перспективе, изображающий металлическое тело 102 с областью 201 поверхности 204, облучаемой излучением заряженных частиц в первый момент времени. Фиг. 4В представляет собой вид в разрезе, изображающий тело 102, по линии 4В-4В фиг. 4А. Фиг. 4А-4В подобны фиг. 2А-2В соответственно.

Направление падения излучения заряженных частиц показано вектором 203, который в этом примере является нормальным к поверхности 204. В этом варианте осуществления флюенс является постоянным по области 201 (например, вся область 201 поверхности одновременно подвергается воздействию равномерного распределения излучения заряженных частиц, или пучок излучения заряженных частиц, имеющий меньшую площадь сечения, чем площадь области 201, перемещается по области 201 равномерно, как будет описано здесь далее). В этот первый момент времени по фиг. 4А и 4В в металлическом теле 102 еще не возникло пузырение.

[48] Фиг. 4С представляет собой другой вид в перспективе, изображающий металлическое тело 102, а фиг. 4D - вид в разрезе, изображающий металлическое тело 102, по линии 4D-4D на фиг. 4С. Облучение области 201 дополнительным, пролонгированным излучением заряженных частиц привело в результате к образованию пузырей 208. Визуальный внешний вид и механизм образования пузырей 208 могут варьироваться. В этом примере образование газовых каверн 209 в поверхности 104 деформировало окружающий материал, проявляясь как деформации (например, отклонения в контуре поверхности, приподнятые поверхностные образования, вздутия, трещины и т.д.), видимые в области 201 поверхности 204. На стадиях, изображенных на фиг. 4А-4D, слой соединения лития либо еще не сформировался, либо некоторый сформировавшийся слой соединения лития еще имеет недостаточной толщины, чтобы препятствовать образованию пузырей или предотвратить образование пузырей, как изображено на фиг. 4Е.

[49] Фиг. 4F представляет собой вид в перспективе, изображающий металлическое тело 102, а фиг. 4G - вид в разрезе, изображающий тело 102, по линии 4G-4G на фиг. 4F. Здесь, после образования пузырей 208, облучение области 201 дополнительным

излучением заряженных частиц привело в результате к образованию слоя 105 соединения лития достаточного размера (например, глубиной 402 на фиг. 4G) в области 201, чтобы вызвать сокращение или уменьшение размера пузырей 208. В некоторых вариантах реализации желательно сформировать слой 105 соединения так, чтобы достаточный размер присутствовал равномерно по релевантной части тела 102 (например, наличие по всей области 201). Фиг. 4G показывает, что в этом примере глубина слоя 105 соединения лития достигла газовых каверн 209 или находится в непосредственной близости от газовых каверн 209, позволяя газу в каверне 209 диффундировать через слои 105 и 103 и из тела 102. Слой 105 соединения лития-меди имеет повышенную способность диффузии газообразного водорода по сравнению с одной лишь медью, а значит, позволяет газообразному водороду в объеме каверн 209 диффундировать вовне и улетучиваться. В результате размер каверн 209 уменьшился по сравнению с фиг. 4D, что, в свою очередь, уменьшило высоту выступающих участков пузырей 208 (фиг. 4G по сравнению с фиг. 4D), и площадь поверхности выступающих участков пузырей 208 (фиг. 4F по сравнению с фиг. 4C).

[50] Поскольку визуальный внешний вид и механизм образования пузырей 208 может варьироваться, способы, которыми уменьшаются пузыри, также могут варьироваться. Примеры уменьшающегося в размере пузыря 208 включают сокращение площади открытой поверхности пузыря 208 на поверхности 204, сокращение высоты пузыря 208 (измеренной относительно высоты смежной не вспученной поверхности или относительно высоты поверхности до вспучивания), сокращение высоты или объема газовой каверны 209, уменьшение размера (ширины или длины) трещины в поверхности 204, уменьшение высоты чешуйки материала, отслаивающейся от поверхности 204, и прочие. Пузыри 208 в виде приподнятых вспучиваний (например, фиг. 2C-2D и фиг. 4C-4D) могут быть также по существу удалены, так что уменьшение пузырей приводит в результате к сокращению общего числа пузырей 208 в конкретной области тела 102.

[51] Применение излучения заряженных частиц в варианте осуществления по фиг. 4A-4G, по меньшей мере до той точки, когда создан слой 105 соединения лития достаточного размера для того, чтобы обеспечить сокращение пузырей, приводит в результате к получению металлического тела 102 с повышенной сопротивляемостью образованию пузырей. Когда излучение применяется за этой точкой, пузыри 208 продолжают уменьшаться, и сопротивляемость образованию пузырей повышается еще больше. Таким образом, металлическое тело 102, подвергнутое процессу, описанному со ссылкой на фиг. 4A-4G, претерпевает некоторую форму кондиционирования материала, которое увеличивает его стойкость к образованию пузырей.

[52] Пузыри в основном формируются в толще материала, где падающая частица останавливается. Для частиц с той же самой энергией длина пробега будет в основном следовать вероятностному распределению (например, гауссову) и будет увеличиваться с увеличением энергии. Прогнозируемая длина пробега главным образом зависит от материала и энергии и типа падающей частицы. Например, протоны с энергией 2 МэВ, падающие на различные материалы, будут иметь приблизительную прогнозируемую длину пробега в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1

Материал	Приблизительная прогнозируемая длина пробега (микрон)
Алюминий	44
Бериллий	50
Углерод	38
Медь	19

Железо	20
Литий	160
Молибден	18
Тантал	17
Титан	30
Вольфрам	14
Ванадий	23

[53] Добавление слоя 103 лития над нелитиевой объемной подложкой будет в некоторой степени замедлять падающие частицы и снижать дистанции остановки согласно таблице 1. Таблица 1 полезна при демонстрации относительных различий в толщинах, на которых пузыри возникают в объемных материалах, и дает рекомендации относительно того, насколько толстым в относительных единицах должен быть слой 105 соединения для того, чтобы достичь прогнозируемой длины пробега частицы.

[54] Фиг. 5 представляет собой блок-схему последовательности операций, изображающую примерный вариант осуществления способа 500 в соответствии с процессом, описанным со ссылкой на фиг. 4А-4G. На этапе 502 излучение заряженных частиц подают к области металлического тела 102 (например, как описано со ссылкой на фиг. 4А-4В). На этапе 504 дополнительное излучение заряженных частиц было подано так, что в этой области образуются и растут в размере один или более пузырей (например, как описано со ссылкой на фиг. 4С-4D). На этапе 506 осуществляют дальнейшую подачу излучения заряженных частиц так, что образуется слой соединения лития, имеющий достаточный размер (например, достаточную толщину), чтобы достичь или оказаться рядом (почти достичь) с одним или более пузырями. Достижение или почти достижение одного или более пузырей может позволить уменьшить в размере или устранить один или более пузырей с помощью дальнейшего излучения. Этап 506 может продолжаться до тех пор, пока сокращение размера пузырей по существу не остановится, пока все пузыри не будут устранены, пока не будет сформирован слой соединения лития желательного размера или толщины, или даже дольше, в зависимости от применения. Интервал между этапами 504 и 506, в некоторых вариантах осуществления, может включать в себя фазу, на которой образование пузырей в области прекращается или по существу прекращается (или прекращается или по существу прекращается рост размера пузырей), но сокращение размера пузырей еще не происходит.

[55] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц может вызвать частичный или полный переход поверхностного материала из кристаллического состояния (включая кристаллическое и поликристаллическое состояния) в аморфное состояние путем разрыва внутрикристаллических связей. Фиг. 6А-6В представляют собой виды в разрезе, подобные фиг. 4Е-4G, изображающие образование аморфного объемного материала. В этих вариантах осуществления переход в аморфный материал происходит во время и после образования соединения лития, хотя образование аморфного материала может происходить независимо от образования соединения. На фиг. 6А излучение 203 заряженных частиц приводит к образованию пузыря 208 с газовой каверной 209. Образование слоя соединения лития происходит в направлении стрелок 602. Переход материала подложки (например, меди) из кристаллического состояния в аморфное состояние может происходить частично, как указано штриховкой 604. Продолжительное облучение излучением 203 вызывает утолщение слоя 105 соединения от поверхности 204 и вызывает дополнительный переход материала в аморфное состояние 604 как в слое 105 соединения, так в области 104 подложки, в частности, в области оболочки пузыря между газовой каверной 209 и слоем 103 лития. Переход в

аморфное состояние в этих областях может быть полным или частичным (например, более 50%, более 75% или более 90%). В определенных вариантах осуществления этот переход в аморфное состояние может быть одной из причин или главной причиной уменьшения или исчезновения пузырей. Переход в аморфное состояние может работать в сочетании с образованием слоя 105 соединения, вызывая уменьшение пузырей. Другие механизмы могут также вносить свой вклад.

[56] Фиг. 7 представляет собой блок-схему последовательности операций, изображающую примерный вариант осуществления способа 700 в соответствии с процессом, описанным в отношении фиг. 6А-6В. На этапе 702 излучение заряженных частиц подают к области металлического тела 102 (например, аналогично фиг. 4А-4В). На этапе 704 дополнительное излучение заряженных частиц было подано так, что образуются и растут в размере один или более пузырей, и область подложки металлического тела 102 может частично переходить из кристаллического в аморфное состояние (например, как описано со ссылкой на фиг. 6А). Это может сопровождаться ростом слоя соединения лития и частичным переходом этого соединения из кристаллического в аморфное состояние. На этапе 706 осуществляют дальнейшую подачу излучения заряженных частиц так, что переход из кристаллического состояния в аморфное состояние продолжается до степени, достаточной для обеспечения уменьшения пузыря 208 (например, 50%, 75%, 90% или больший переход в аморфное состояние). Этот переход может происходить по всему металлическому телу 102, но в целях уменьшения пузырей переход происходит по меньшей мере в области подложки (и соединения, если оно присутствует) между пузырем и верхней поверхностью 204 (слой лития не должен переходить). В некоторых вариантах осуществления уменьшение пузырей может также зависеть от увеличения слоя соединения до глубины, которая достигает или становится смежной с (почти достигает) одним или более пузырями. Этап 706 может продолжаться, пока уменьшение размера пузырей по существу не прекратится, пока все пузыри не исчезнут, пока не образуется слой соединения лития желательного размера или толщины, или дольше в зависимости от применения. Интервал между этапами 704 и 706, в некоторых вариантах осуществления, может включать в себя фазу, на которой образование пузырей в области прекращается или по существу прекращается (или прекращается или по существу прекращается рост размера пузырей в области), но уменьшение размера пузырей еще не происходит.

[57] Варианты осуществления металлических тел 102, описанные здесь, могут быть подвергнуты способам 300, 500 или 700 во время работы устройства, компонентом или элементом которого является тело 102, и поэтому могут претерпевать кондиционирование стойкости к пузырению во время самой своей работы. Альтернативно (или дополнительно), варианты осуществления металлических тел 102 могут быть подвергнуты способу 300, 500 или 700 перед работой, в качестве способа изготовления или кондиционирования, и этот кондиционированный материал может быть затем собран или установлен как часть большей системы или установки или иным образом сначала введен в эксплуатацию при желательном применении с повышенной стойкости к пузырению.

[58] В этом и других описанных здесь вариантах осуществления излучение заряженных частиц может подаваться непрерывно или прерывисто для достижения уменьшения пузырей и/или стойкости к их образованию. Например, во время процедуры подачи излучения излучение может подаваться (например, пучком или реакцией) непрерывным или импульсным образом (например, прерывисто с постоянной или переменной частотой). Эта процедура подачи излучения может быть остановлена на существенный

период времени (например, в том случае, когда выключено питание системы или же система иным образом выведена из эксплуатации, например, для обслуживания системы или иным образом) и затем запущена снова (возобновлена), и преимущества

5 противодействия пузырению могут все еще достигаться даже при этом прерывистым циклировании всей системы.

[59] Металлические тела 102, функционирующие в рамках или кондиционированные в соответствии с описанными здесь процессами (со ссылкой на фиг. 2А-7 выше и другие нижеследующие варианты осуществления), могут использоваться во множественных применениях. Например, металлические тела 102 могут использоваться в плазменных

10 устройствах ядерного синтеза, таких как обращенные к плазме стенки для камер удержания плазмы термоядерных реакторов. Металлические тела 102 могут также использоваться в ускорителях частиц, устройствах ионной имплантации, спутниках и космических аппаратах, устройствах для производства изотопов, устройствах для обнаружения опасных материалов, устройствах для анализа образцов руд драгоценных

15 металлов, устройствах визуализации и других.

[60] Одним примерным вариантом применения отмеченного является бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ), причем металлическое тело 102 может быть предназначено для использования в качестве устройства мишени для генерирования нейтронов в нейтронно-лучевой системе. Пример нейтронно-лучевой системы 800

20 описан здесь более подробно со ссылкой на фиг. 8А.

[61] БНЗТ представляет собой разновидность лучевой терапии для лечения раковых заболеваний. При БНЗТ пациенту дозированно вводится лекарство, содержащее бор, причем это лекарство обладает свойством, которое заставляет бор избирательно поглощаться раковыми клетками в любых местах опухоли в теле пациента. Затем

25 пациента облучают нейтронным излучением, в частности, эпитепловыми нейтронами с энергиями в диапазоне от одного килоэлектронвольта (кэВ) до 10 кэВ, а в некоторых случаях и до 30 кэВ. Эти эпитепловые нейтроны взаимодействуют с бором посредством ядерной реакции, которая производит альфа-частицы, имеющие очень короткую длину пробега, например, порядка толщины одной клетки. Таким образом, облучение

30 содержащих бор раковых клеток эпитепловыми нейтронами генерирует альфа-излучение с дозой, достаточной для уничтожения клеток опухоли, без серьезных побочных эффектов на окружающие ткани.

[62] Чтобы сгенерировать достаточный поток эпитепловых нейтронов, пучок заряженных частиц, такой как пучок протонов (или положительных ионов водорода

35  $(H^+)$ ), направляют на мишень из  ${}^7Li$ , где последующая ядерная реакция  $p + {}^7Li \rightarrow n + {}^7Be$  генерирует пучок нейтронов.  ${}^7Li$  обычно рассматривается как наиболее оптимальный материал нейтронопродуцирующей мишени по двум причинам. Во-первых, он обеспечивает один из наиболее высоких коэффициентов преобразования протонов в

40 нейтроны. Во-вторых,  $p + {}^7Li$  является эндометрической реакцией и требует, чтобы энергия протонов была выше определенного порога, около 1,9 МэВ, чтобы произошла генерация нейтронов. Нейтроны, сгенерированные при этом пороге или выше этого порога (например, от 1,9 МэВ до примерно 3,0 МэВ), имеют энергии нейтронов в общем меньше, чем 1 МэВ, и могут быть относительно легко замедлены до эпитеплового

45 диапазона примерно 1 кэВ - 30 кэВ.

[63] Нейтроны могут быть замедлены с использованием модератора. Замедление посредством ядер модератора происходит вследствие упругого и неупругого рассеяния, и это имеет вероятностный характер, так как движение нейтронов напоминает

броуновское движение частиц. В результате, чем ниже энергия первичных нейтронов, тем уже энергетический спектр нейтронов. В этом контексте реакция  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ , характеризующаяся быстрым ростом сечения вблизи порога генерации нейтронов, представляется идеальной, так как может быть минимизировано количество нейтронов, получаемых в мягком (например, <1 кэВ) и жестком (>30 кэВ) диапазонах энергии. Клиницисты обычно хотят, чтобы количество мягких и жестких нейтронов было минимизировано, поскольку они приводят к более высокой токсичности для пациента и более серьезным побочным эффектам. Таким образом, нейтронно-лучевая система, работающая в этом диапазоне выше энергетического порога реакции  ${}^7\text{Li}$ , может быть сконфигурирована для нахождения оптимального баланса между выходом нейтронов и качеством результирующего энергетического спектра нейтронов.

[64] Поскольку генерирующая нейтроны реакция является эндотермической, генерируется значительное количество тепла, и мишень  ${}^7\text{Li}$  (часто называемая просто литиевой мишенью) должна это учитывать. Предшествующие решения помещают слой лития на металлическую подложку с высокой теплопроводностью (например, медную) в комбинации с водяным охлаждением, чтобы поддерживать температуру мишени или мишенного узла достаточно низкой, так что литий не испаряется (например, и не образует радиоактивное загрязнение в тракте пучка). Однако эти предшествующие решения были подвержены пузырению в результате применения энергетического пучка протонов, и тратились значительные усилия на предотвращение образования пузырей в литиевой мишени.

[65] Методы предотвращения пузырения часто включают помещение противодействующего пузырению материала между литием и нижележащей медной подложкой. Использовались материалы с высокими коэффициентами диффузии водорода (например, тантал, ниобий, ванадий и палладий), однако эти материалы имеют тенденцию к значительно более низкой теплопроводности, чем у меди, и поэтому могут затруднить охлаждение мишени.

[66] В общем, поскольку литий характеризуется высокой химической активностью, низкой температурой плавления (например, 182°C) и низкой теплопроводностью (например, 71 Вт/(м·К) в твердом состоянии и 43 Вт/(м·К) в жидком состоянии), проектирование литиевой нейтроногенерирующей мишени может представлять собой сложную техническую задачу. Также необходимо учитывать другие соображения. Например, в дополнение к выделению тепла, генерация нейтронов сопровождается потоком гамма-лучей. Чтобы значительно уменьшить поток гамма-лучей и температуру на литиевой поверхности, слой лития должен быть достаточно тонким, так что протоны замедляются в нем до порога генерации нейтронов. Также желательно использовать литий с относительно высокой чистотой, чтобы максимизировать выход нейтронов. Например, относительно чистый литий обеспечивает выход нейтронов, который приблизительно в 1,43 раза больше, чем у гидрида лития, приблизительно в два раза больше, чем у оксида лития, и приблизительно в 3,3 раза больше, чем у фторида лития. Чтобы предотвратить испарение лития, что может загрязнять лучевую систему и оборудование радиоактивным  $\text{Be-7}$  (захваченным внутри лития), мишень должна интенсивно охлаждаться. Должна использоваться тонкая нижележащая подложка, чтобы обеспечивать возможность расположения нейтронного модератора узла формирования пучка как можно ближе к слою лития. В некоторых случаях желательно, чтобы мишень имела общую толщину, которая меньше, чем полная прогнозируемая длина пробега протонов. Более того, желательно, чтобы подложка была устойчива к

повреждению излучением, проста в изготовлении и легко удалялась из системы для способствования утилизации.

[67] Фиг. 8А представляет собой схематичный вид, изображающий примерный вариант осуществления нейтронно-лучевой системы 800 на основе ускорителя. Хотя конфигурации нейтронно-лучевых систем варьируются, в этом варианте осуществления система 800 включает в себя тракт 820 низкоэнергетического пучка, служащий в качестве инжектора пучка ионов, высоковольтный (HV) ускоритель-тандем 840, связанный с инжектором 820 пучка ионов, и тракт 850 высокоэнергетического пучка, проходящий от ускорителя-тандема 840 до узла 801 литиевой мишени, который может заключать в себе литиевую мишень 802 (см. фиг. 8В). Инжектор 820 пучка ионов может включать в себя источник 822 ионов, вакуумную камеру 824 источника ионов, проходящую от источника 822 ионов, трубчатый предускоритель 826, связанный с вакуумной камерой 824 источника ионов, и насосную камеру (например, со встроенным цилиндром Фарадея) 828, подсоединенную между трубчатым предускорителем 826 и ускорителем-тандемом 840. Источник 822 ионов служит в качестве источника заряженных частиц (которые в примерных вариантах осуществления представляют собой отрицательные ионы водорода), которые могут быть ускорены, кондиционированы и в итоге использованы для получения нейтронов при доставке к литиевой мишени 802.

[68] Двумя типами источников 822 отрицательных ионов, которые отличаются механизмом генерации отрицательных ионов, являются: поверхностный тип и объемный тип. Поверхностный тип требует наличия цезия (Cs) на специальных внутренних поверхностях. Обсуждение источника отрицательных ионов поверхностного типа представлено в опубликованной заявке РСТ № WO2014039579A2, которая включена сюда по ссылке во всей своей полноте для всех целей. Объемный тип основан на формировании отрицательных ионов в объеме сильноточной газоразрядной плазмы. Оба типов источников ионов могут давать достаточный ток отрицательных ионов.

[69] Вакуумная камера 824 источника ионов, трубчатый предускоритель 826 и насосная камера 828 выполнены с возможностью переносить пучок ионов от источника 822 ионов к входу ускорителя-тандема 840. Этот тракт 820 низкоэнергетического пучка может иметь один или более магнитных элементов для фокусировки и отклонения пучка, чтобы совмещать пучок с осью тракта пучка и углом приема ускорителя-тандема 840.

[70] Трубчатый предускоритель 826 обеспечивает ускорение пучка отрицательных ионов, введенного из источника 822 ионов. Трубчатый предускоритель 826 выполняет важную функцию фокусировки пучка, чтобы добиться общей сходимости для совмещения с площадью апертуры на входе высоковольтного ускорителя-тандема 840.

[71] Ускоритель-тандем 840, который запитывается подсоединенным к нему высоковольтным источником 842 питания, может формировать пучок протонов с энергией, равной удвоенному напряжению, приложенному к ускоряющим электродам, расположенным в ускорителе-тандеме 840. Уровень энергии пучка протонов достигается путем ускорения пучка отрицательных ионов водорода от входа ускорителя-тандема 840 к самому внутреннему электроду высокого потенциала, отрыва двух электронов от каждого иона и затем ускорения полученных в результате протонов (ионов  $H^+$ ) далее по потоку тем же самым приложенным напряжением.

[72] Тракт 850 высокоэнергетического пучка переносит пучок протонов от выхода ускорителя-тандема 840 к мишени 802 в узле 801 мишени, расположенном на конце ответвления 870 тракта пучка, проходящего в процедурный кабинет для лечения пациента. В примерном варианте осуществления, показанном на фиг. 8А, тракт 850

высокоэнергетического пучка включает в себя три ответвления 870, 880 и 890 для прохождения в три разных процедурных кабинета для лечения пациентов. Тракт 850 высокоэнергетического пучка может включать в себя насосную камеру 851, квадрупольные магниты 852 и 872 для предотвращения расфокусировки пучка, дипольные или отклоняющие магниты 856 и 858 для направления пучка в процедурные кабинеты, корректоры 853 пучка, диагностическое оборудование, такое как приборы 854 и 876 контроля тока, секция прибора 855 быстрого контроля положения пучка и сканирующий магнит 874.

[73] Конфигурация тракта 850 высокоэнергетического пучка зависит от конфигурации лечебного учреждения. Вариант осуществления по фиг. 8А предназначен для двухэтажной конфигурации лечебного учреждения. Один из процедурных кабинетов, который ближе к узлу 801 мишени, расположен на нижнем этаже. Пучок доставляется к узлу 801 мишени с использованием отклоняющего магнита 856. После этого квадрупольные магниты 872 фокусируют пучок до определенного размера на мишени 802. Пучок можно перемещать (например, растривать, сканировать или осциллировать) по поверхности мишени 802 магнитами 874. Движение пучка может способствовать достижению плавного и даже усредненного по времени распределения пучка протонов на литиевой мишени 802, предотвращая перегрев и делая генерацию нейтронов более равномерной в пределах литиевого слоя мишени 802.

[74] После прохождения сканирующих магнитов 874 пучок доставляется в прибор 876 контроля тока, который измеряет ток пучка и может действовать как предохранительный прерыватель. Узел 801 мишени может быть физически отделен от объема тракта высокоэнергетического пучка запорным клапаном 877. Функция запорного клапана состоит в отделении вакуумного объема тракта пучка от мишени во время замены/загрузки мишени. На фиг. 8А также показана (частично) горизонтальная ориентация тракта пучка (ответвлений 880 и 890 во второй и, возможно, третий процедурные кабинеты). В этом случае пучок не отклоняется на 90 градусов отклоняющим магнитом 856, а, напротив, идет напрямую вправо, затем он проходит квадрупольные магниты 852, которые расположены в горизонтальном тракте пучка. Потом пучок может отклоняться другим отклоняющим магнитом 858 на необходимый угол, в зависимости от конфигурации помещения. В противном случае, отклоняющий магнит 858 можно заменить Y-образным магнитом, чтобы разделить пучок на два направления для двух разных процедурных кабинетов, расположенных на одном и том же этаже. Столкновение пучка с мишенью 802 создает пучок нейтронов, который может быть затем сформирован и модифицирован узлом формирования пучка нейтронов (не показан), который может выводить пучок нейтронов непосредственно к пациенту.

[75] Фиг. 9А представляет собой блок-схему последовательности операций, изображающую примерный вариант осуществления способа 900 получения пучка нейтронов, аналогичного процессу, описанному со ссылками на фиг. 3. На этапе 902 подают пучок протонов к области мишени 802 (например, как описано со ссылкой на фиг. 2А-2В). Пучок протонов предпочтительно имеет энергию в диапазоне от 1,9 МэВ до 3,0 МэВ, хотя не ограничен этим. Пучок протонов может подаваться непрерывным или импульсным образом, может поддерживаться в статическом положении или может перемещаться по поверхности мишени 802 с любым желательным рисунком развертки (например, см. фиг. 8Е и 8F, показывающие соответственно ступенчатый и спиральный рисунки развертки). На этапе 904 пучок протонов подают так, что в упомянутой области образуются и растут в размере один или более пузырей (например, как описано со ссылкой на фиг. 2С-2D). Это может происходить без значительного ухудшения выхода

нейтронов, как будет описано со ссылкой на фиг. 10В-10С. На этапе 906 пучок протонов все еще подают в дальнейшем, так что эти один или более пузырей уменьшаются в размере. Этап 906 может продолжаться до тех пор, пока уменьшение размера пузырей по существу не прекратится, пока все пузыри не исчезнут, или после этого, чтобы  
5 продолжать получение нейтронов для БНЗТ. Опять же, облучение протонами может продолжаться без значительного ухудшения выхода нейтронов до тех пор, пока, например, слой лития не станет чрезмерно истонченным. Интервал между этапами 904 и 906, в некоторых вариантах осуществления, может включать в себя фазу, на которой образование пузырей в упомянутой области прекращается или по существу  
10 прекращается (или прекращается или по существу прекращается рост размера пузырей в упомянутой области), но уменьшение размера пузырей еще не происходит.

[76] Фиг. 9В представляет собой блок-схему последовательности операций, изображающую примерный вариант осуществления способа 950 получения пучка нейтронов, аналогичного процессу, описанному со ссылкой на фиг. 5. На этапе 952  
15 подают пучок протонов к области мишени 802 (например, как описано со ссылкой на фиг. 4А-4В). Как и в предыдущем варианте осуществления, пучок протонов предпочтительно имеет энергию в диапазоне от 1,9 МэВ до 3,0 МэВ, хотя не ограничен этим. Пучок протонов может опять же подаваться непрерывным или импульсным образом, может поддерживаться в статическом положении или может перемещаться  
20 по поверхности мишени 802 с любым желательным рисунком развертки. На этапе 954 пучок протонов подают так, что в упомянутой области образуются и растут в размере один или более пузырей (например, как описано со ссылкой на фиг. 4С-4D). Это может происходить без значительного ухудшения выхода нейтронов, как будет описано со ссылкой на фиг. 10В-10С. На этапе 956 пучок протонов все еще подают в дальнейшем,  
25 так что образуется слой соединения лития, имеющий достаточный размер (например, толщину), чтобы достигать или становиться смежным с (почти достигать) одним или более пузырями и позволять уменьшать в размере один или более пузырей дальнейшим излучением. Этап 956 может продолжаться до тех пор, пока уменьшение размера пузырей по существу не прекратится, пока все пузыри не исчезнут, пока не образовался  
30 слой соединения лития желательного размера или толщины, или после этого, чтобы продолжать получение нейтронов для БНЗТ. Опять же, облучение протонами может продолжаться без значительного ухудшения выхода нейтронов до тех пор, пока, например, слой лития не станет чрезмерно истонченным из-за образования слоя соединения. Интервал между этапами 954 и 956, в некоторых вариантах осуществления,  
35 может включать в себя фазу, на которой образование пузырей в упомянутой области прекращается или по существу прекращается (или прекращается или по существу прекращается рост размера пузырей в упомянутой области), но уменьшение размера пузырей еще не происходит.

[77] Фиг. 9С представляет собой блок-схему последовательности операций, изображающую примерный вариант осуществления способа 980 получения пучка нейтронов, аналогичного процессу, описанному со ссылкой на фиг. 7. На этапе 982  
40 подают пучок протонов к области мишени 802. Пучок протонов предпочтительно имеет энергию в диапазоне от 1,9 МэВ до 3,0 МэВ, хотя не ограничен этим. Пучок протонов может опять же подаваться непрерывным или импульсным образом, может поддерживаться в статическом положении или может перемещаться по поверхности  
45 мишени 802 с любым желательным рисунком развертки. На этапе 984 пучок протонов подают так, что образуются и растут в размере один или более пузырей, и область подложки мишени 802 частично переходит из кристаллического в аморфное состояние

(например, как описано со ссылкой на фиг. 6А). Это может сопровождаться ростом слоя соединения лития и частичным переходом этого соединения из кристаллического в аморфное состояние. Это может происходить без значительного ухудшения выхода нейтронов, как будет описано со ссылкой на фиг. 10В-10С. На этапе 986 все еще  
5 осуществляют дальнейшую подачу излучения заряженных частиц, так что переход в аморфное состояние продолжается до степени, достаточной для обеспечения уменьшения пузырения (например, 50%, 75%, 90% или больший переход в аморфное состояние). Этот переход может происходить по всей мишени 802, но в целях уменьшения пузырей переход происходит по меньшей мере в области мишени 802 между пузырем и верхней  
10 поверхностью 204 (слой лития не должен переходить). Этап 986 может продолжаться до тех пор, пока уменьшение размера пузырей по существу не прекратится, пока все пузыри не исчезнут, пока не образован слой соединения лития желательных размера или толщины, или после этого, чтобы продолжать получение нейтронов для БНЗТ. В некоторых вариантах осуществления уменьшение пузырей может также зависеть от  
15 увеличения слоя соединения до глубины, которая достигает или становится смежной с одним или более пузырями (почти достигает их). Этап 986 может продолжаться до тех пор, пока уменьшение размера пузырей по существу не прекратится, пока все пузыри не исчезнут, пока не образован слой соединения лития желательных размера или толщины, или дольше в зависимости от применения. Опять же, облучение протонами  
20 может продолжаться без значительного ухудшения выхода нейтронов до тех пор, пока, например, слой лития не станет чрезмерно истонченным из-за образования слоя соединения. Интервал между этапами 984 и 986, в некоторых вариантах осуществления, может включать в себя фазу, на которой образование пузырей в упомянутой области прекращается или по существу прекращается (или прекращается или по существу  
25 прекращается рост размера пузырей в упомянутой области), но уменьшение размера пузырей еще не происходит.

[78] Описанные здесь варианты осуществления мишеней 802 могут быть подвергнуты способам 900, 950 или 980 во время работы нейтронно-лучевой системы 800. Работа этой системы может иметь целью кондиционирование мишени 802 для того, чтобы  
30 повысить ее стойкость к пузырению при использовании на пациенте. Альтернативно, работа этой системы может происходить при лечении пациента, так что пузыри образуются и уменьшаются в размере во время одной или более процедур, при которых подают нейтроны непосредственно к пациенту в терапевтических целях. Реализация способов 900, 950 или 980 может также происходить при работе системы 800 в ходе  
35 комбинированного использования как без пациента, так и с пациентом. В другом варианте осуществления способы 900, 950 и/или 980 могут быть реализованы при изготовлении мишени 802 (например, перед дистрибуцией мишени 802 в центр лечения пациентов методом БНЗТ) с использованием излучения, создаваемого системой излучения заряженных частиц, отличной от системы, спроектированной для применения  
40 на пациентах-людях.

[79] Возвращаясь к фиг. 8В, эта фигура представляет собой вид в перспективе, изображающий примерный вариант осуществления мишени 802 перед тем, как она будет подвергнута воздействию излучения частиц, достаточному, чтобы вызвать  
пузырение. В этом варианте осуществления мишень 802 имеет форму диска и аналогична  
45 металлическому телу 102 в том, что она включает в себя слой 103 лития и металлическую подложку 104. Медь оказалась особенно выгодной в качестве материала для подложки 104, хотя приведенные здесь варианты осуществления не ограничены этим. Фиг. 8С представляет собой вид в разрезе мишени 802 по линии 8С-8С на фиг. 8В. Фиг. 8С

изображает наличие охлаждающих каналов 804 на задней стороне подложки 104. Каналы 804 могут использоваться для циркуляции охладителя по задней стороне подложки 104 во время работы системы 800, чтобы рассеивать тепло, выделяемое эндотермической реакцией генерации нейтронов. Фиг. 8D представляет собой вид в разрезе мишени 802 после того, как она подвергнута воздействию излучения частиц, достаточному для образования слоя 105 соединения лития. В тех вариантах осуществления, где подложка 104 является медной, слой 105 соединения лития представляет собой соединение лития-меди. Фиг. 8E представляет собой вид в разрезе мишени 802 после того, как она подвергнута воздействию излучения частиц, достаточному для образования аморфной области 604 в подложке 104.

[80] Фиг. 8F и 8G представляют собой виды спереди мишени 802, показывающие соответственно ступенчатый рисунок 860 развертки и спиральный рисунок 862 развертки при движении пучка. Пучок может двигаться непрерывно назад и вперед по этим рисункам развертки в обоих направлениях (на фигурах указано одно направление). В зависимости от размера пятна пучка, развертка может приводить или не приводить к равномерному флюенсу, доставляемому по всей поверхности мишени 802. Описанные здесь антидеформационные преимущества могут быть реализованы при как равномерном, так и неравномерном флюенсе по поверхности изображенной здесь мишени 802. В этих вариантах осуществления слой лития присутствует по всей показанной здесь поверхности, однако в других вариантах осуществления мишени 802 слой лития может быть ограничен только внутренней областью показанной здесь поверхности.

[81] Слой 103 лития может быть в твердом виде или жидком виде. Если он в жидком виде, слой 103 лития может помещаться на подложку 104 в твердом виде, так что твердая подложка может быть ориентирована под желательным углом (например, 0-90 градусов) относительно оси входящего пучка. Жидкий литий должен образовываться на подложке таким образом, который не позволяет испаряться значительным количеством лития (и тем самым потенциально загрязнять систему или оборудование). Слой жидкого лития обеспечивает возможность использования существенно более высоких плотностей мощности пучка протонов, что, в свою очередь, обеспечивает возможность использования мишени относительно меньших диаметра или ширины.

[82] Слой 103 лития может иметь толщину, которая является предпочтительно достаточной для обеспечения возможности роста слоя соединения лития при поддержании постоянного выхода нейтронов, так как диффузия лития в подложку вызовет истончение слоя 103 лития. В таблице 2 перечислены примерные характеристики лития для разных энергий протонов во встречающемся в природе литии (например,  ${}^7\text{Li}$ , содержащий примерно 10%  ${}^6\text{Li}$ ). Прогнозируемая длина пробега в литии представляет собой длину пробега протона при каждой энергии до остановки движения. Глубина до порога представляет собой глубину в литии, которую достигает протон с приблизительно 1,88 МэВ, что является порогом, при котором прекращается генерация нейтронов. Для чистого  ${}^7\text{Li}$  глубина до порога немного выше (например, 17,7 микрон для 2,00 МэВ, 92,5 микрон для 2,50 МэВ).

Таблица 2

45

Энергия протонов (МэВ)	Прогнозируемая длина пробега в литии (микрон)	Глубина до порога (микрон)
3,00	319,77	176,27
2,75	274,89	131,39

2,50	233,11	89,61
2,25	194,48	50,98
2,00	159,08	15,58
1,80	133,12	н/д

5 [83] Слой лития, используемый в нейтроногенерирующей мишени, предпочтительно имеет толщину, по меньшей мере равную значению глубины до порога, и, таким образом, желательная толщина слоя лития зависит от ожидаемой энергии падающих протонов. В общем, толщина слоя лития при применении для БНЗТ может составлять в диапазоне 1-300 микрон, чтобы поглощать протоны с энергиями в диапазоне 1,88-3,0 МэВ.

10 [84] Фиг. 10А-10С представляют собой графики, изображающие данные, собранные во время экспериментальной проверки описанных здесь вариантов осуществления. Эти экспериментальные данные отражают результаты, собранные после воздействия на вариант осуществления мишени 802 протонным излучением в форме пучка, генерируемого вариантом осуществления нейтронно-лучевой системы 800, аналогичной системе, описанной со ссылкой на фиг. 8А-8С. Исследуемая мишень включала в себя подложку 104 из мелкозернистой меди 99,996% со слоем 103 лития толщиной 84 мкм (микрона), который был напылен на подложку 104. Мишень облучали пучком протонов, имеющим диаметр приблизительно 10 мм и ток  $500 \pm 10$  мкА, в течение 11 дней (4 часа (ч) в день) на 15-дневном интервале. Интеграл тока на образце составил 21,08 мА·ч. Мишень главным образом облучали тогда, когда пучок имел энергию протонов 1,8 МэВ, ниже порога генерации нейтронов, и в течение короткого времени при более высоких энергиях 1,92 и 2,04 МэВ для определения выхода нейтронов (см. фиг. 10В-10С).

25 [85] Фиг. 10А представляет собой график, изображающий относительное число пузырей (ось y) (относительное число в центре пучка) в зависимости от времени облучения (ось x), которое является тем временем, в течение которого пучок подавали к мишени 602. В течение всего времени облучения поверхность исследуемого образца контролировали при помощи длиннофокусного микроскопа KX InfiniMax<sup>TM</sup> с КМОП-камерой Basler Ace acA4112-30uc и видеокамерой Hikvision и записывали видеосигналы. Ясно наблюдали появление и исчезновение пузырей в различных частях поверхности мишени. Фиг. 11А представляет собой макроскопическое изображение поверхности лития, а фиг. 11В-11С - изображения, снятые длиннофокусным микроскопом на шестой день облучения. Фиг. 11А показывает темную полосу 1102 с шириной полосы 30 приблизительно 1 мм и внутренним диаметром приблизительно 13 мм, что совпадает с положением основной мощности пучка протонов. Область 1104 соответствует центру мишени 802. Область 1106 соответствует периферийной области вне основной зоны 1102 пучка, которая все еще облучалась протонным излучением. Область 1108 указывает поверхность мишени, не облученную протонами. Фиг. 11В представляет собой 40 увеличенное изображение, показывающее область 1102 поверхности литиевой мишени, соответствующую попаданию центра пучка протонов, а фиг. 11С показывает увеличенное изображение области 1106 поверхности литиевой мишени на периферии пучка. Видно, что поверхность лития однородна в центре пучка протонов, при этом пузыри отсутствуют, в то время как пузыри явно выражены на периферии пучка.

45 [86] Модификация поверхности лития пузырями была количественно определена как область с высокой яркостью в выбранной части изображения. Каждый 720-ый кадр файла видеосигнала был обработан компьютером (приблизительно каждые 30 секунд). Обработка различила области высокой яркости, соответствующие пузырям, и

определила площади этих областей в двух частях изображения: в центре пучка и на его периферии. Результат обработки видеосигнала микроскопа проиллюстрирован на фиг. 10А, причем кривая 1001 соответствует области поверхности мишени, подвергавшейся воздействию центра пучка, а кривая 1002 соответствует области поверхности мишени, подвергавшейся воздействию периферии пучка. Здесь по оси Y приведено относительное количество зон высокой яркости выбранной части изображения (в центре пучка и на периферии), а ось X показывает последовательность обработанных кадров изображения, сгруппированных по дням облучения для 11 разных дней на 15-дневном интервале. Большая часть кривой 1001, указывающей возрастание пузырей от нулевого времени до пикового значения 1010, опущена. Чтобы сделать результат видимым, на графике начерчены вертикальные линии, отделяющие один день облучения от другого. Поскольку выходная мощность пучка не менялась во время работы, ось x также в общем соответствует флюенсу протонов на мишени 802. Полное время, указанное числом 1020, составляет приблизительно 42 часа.

[87] Данные 1001 подсчета пузырей демонстрируют, что во время 1003 в мишени 802 произошло образование пузырей и достигло пикового уровня 1010. От времени 1003 до времени 1004 счет пузырей в мишени 802 быстро снижался. Как описано по отношению к вариантам осуществления фиг. 4А-5, во время 1003 слой соединения лития, который формировался между слоем 103 лития и подложкой 104, мог достичь достаточной глубины, чтобы обеспечить возможность диффузии водорода из пузырей и наружу из тела 102. Альтернативно, как описано по отношению к вариантам осуществления фиг. 6А-7, в образующем пузырь материале, таком как оболочка пузыря, мог произойти переход из кристаллической в аморфную структуру, а затем эта оболочка вместе с проникшим литием перемещалась в целом в подложку. Альтернативно, могло произойти некое сочетание того и другого.

[88] Следующие варианты осуществления описывают дополнительные механизмы, которые могли вносить вклад полностью или частично в уменьшение размера и/или количества пузырей. Например, облучение пучком протонов может вызывать конвекционные силы, уменьшающие пузыри, например, посредством перевода лития из твердой в локализованную жидкую форму (например, горячее пятно), что может позволить водороду выйти и/или вызывать перемещение оболочки пузыря к подложке. В качестве другого примера, облучение пучком протонов может вызвать то, что система капилляров с капиллярными силами уменьшает пузыри, например, побуждая литий проникать в трещины, щели или другие деформации в материале подложки, тем самым позволяя водороду выйти и/или вызывая перемещение оболочки пузыря к подложке. Механизмом может также быть сочетание конвекционного и капиллярного действия.

[89] В этом эксперименте, во время 1004, подача пучка была остановлена на некоторый период времени и после этого запущена повторно. В результате этой остановки, после повторного запуска существовал короткий период образования пузырей от времени 1004 до времени 1005, в этот момент уменьшение пузырей началось снова, и общее число пузырей упало до еще более низкого уровня, чем было во время 1004. Аналогичные циклы возникали во времена 1006, 1007, 1008 и 1009. Однако мишень 602 проявляла повышенную стойкость к образованию пузырей в начале каждого цикла, так что проявляется общая тенденция к уменьшению пузырей с повышенной стойкостью к образованию пузырей со временем. Общее число пузырей снизилось до почти нулевого числа в конце эксперимента, что представляет собой более чем 99%-ое уменьшение от пика. В других вариантах осуществления уменьшение может быть несколько меньшим, например, больше 75%, больше 90% или больше 95%.

[90] Фиг. 10В и 10С представляют собой графики, изображающие выход нейтронов из мишени 602 по оси  $y$  в зависимости от интеграла  $\Phi$  тока протонов в миллиампер-часах (мА·ч) по оси  $x$ . Данные на фиг. 10В были измерены дозиметром и отображают по оси  $y$  мощность дозы  $D$  нейтронов. Данные на фиг. 10С были измерены детектором нейтронов и показывают по оси  $y$  скорость счета  $Y$  излучения в обратных секундах. На этих графиках точка 21 на оси  $x$  соответствует флюенсу протонов, равному  $6,3 \pm 0,6 \times 10^{20}$  протонов на квадратный сантиметр ( $p/cm^2$ ). Оба графика указывают на то, что выход нейтронов оставался в основном постоянным по мере возрастания флюенса протонов, и выходы нейтронов находились в основном в диапазоне от 95 до 108 для дозиметра по фиг. 10В и от 1617 до 1915 для детектора по фиг. 10С. Точка 21 также в основном соответствует точке 1020 на фиг. 10А. Таким образом, выход нейтронов оставался в основном постоянным на протяжении этих периодов времени, когда пузыри образовывались и когда пузыри уменьшались и исчезали. Таким образом, наличие пузырей в общем не влияло на выход нейтронов. Отсутствие ухудшения выхода нейтронов также указывает на то, что водород, диффундирующий из подложки 104 через слой 103 лития, не образовывал гидридов или гидроксидов с литием или литием-медью (или образовывал только следы или пренебрежимо малое количество, существенно не ухудшая выход нейтронов, в то время как пузыри образовывались и исчезали). Флюенс протонов точки 21 может быть выражен с точки зрения лечения пациента. Если этот флюенс масштабировать, например, на мишень с областью облучения приблизительно 10 см в диаметре, используемую с пучком протонов, имеющим энергию 2,3 МэВ и ток 10 миллиампер (мА), то флюенс точки 21 соответствовал бы БНЗТ-терапии для приблизительно 340 пациентов (предполагая 40 минут на пациента).

[91] В некоторых из предыдущих вариантов осуществления описаны методы, где подача излучения заряженных частиц к металлическому телу заставляет это тело претерпевать первую фазу образования пузырей, за которой следует вторая фаза, где пузыри уменьшаются в размере или исчезают совсем, не требуя образования слоя соединения лития. Также здесь описаны варианты осуществления, где за первой фазой образования пузырей следует вторая фаза уменьшения или исчезновения пузырей путем образования слоя соединения лития. Кроме того, здесь описаны варианты осуществления, где за первой фазой образования пузырей следует вторая фаза уменьшения или исчезновения пузырей путем перехода материала подложки, в отдельности или в комбинации с соединением лития, из кристаллического состояния в главным образом аморфное состояние. В дополнение к этим вышеупомянутым вариантам осуществления, теперь будут описаны дополнительные варианты осуществления, где слой соединения лития и/или аморфный материал формируют перед воздействием излучением, что обычно привело бы к образованию пузырей. Эти варианты осуществления с заранее существующими слоем соединения лития и/или аморфной структурой имеют повышенную стойкость к образованию пузырей и при определенных условиях могут совсем предотвратить образование пузырей, таким образом исключая какие-либо остаточные, и потенциально нежелательные, структурные деформации, которые могут сохраняться даже после того, как пузыри были уменьшены и/или удалены.

[92] Вариант осуществления металлического тела 102, описанный со ссылкой на фиг. 1D-1E, может быть изготовлен перед облучением излучением заряженных частиц так, что образуются пузыри. Например, слой 105 соединения лития может быть сначала сформирован на или в металлической подложке 104, осажден на нее или присоединен

к ней, а затем слой 103 лития может быть после этого сформирован на или в слое 105 соединения лития, осажден на него или присоединен к нему. И наоборот, слой 105 соединения лития может быть сначала сформирован на или в слое 105 соединения лития, осажден на него или присоединен к нему, а затем металлическая подложка 104 может  
5 быть после этого сформирована на слое 105 соединения лития, осаждена на него или присоединена к нему.

[93] В другом варианте осуществления сначала изготавливают металлическое тело 102 со слоем 103 лития в непосредственном контакте с подложкой 104. Металлическое тело 102 может быть затем подвергнуто воздействию одного или более стимулов,  
10 например, тепла, электричества и/или давления в течение конкретного времени, так что литий из слоя 103 диффундирует в подложку 104 и образует слой 105 соединения в области, ранее занятой лишь слоем лития, лишь металлической подложкой или ими обоими. Условия и время, при которых применяются один или более стимулов, могут определять итоговую толщину 112 слоя 105 соединения.

[94] Подложка 104, имеющая аморфную структуру, может быть снабжена слоем 103 лития на ней или может быть преобразована в аморфную структуру после добавления слоя 103 лития. Аналогично, слой 105 соединения лития, имеющий аморфную структуру, может также быть обеспечен в соответствии с описанными выше методами или может  
15 быть обеспечен в кристаллическом состоянии и затем преобразован в аморфное состояние. Металлическое тело 102 может быть затем применено по желательному назначению с уже заранее существующей аморфной структурой.

[95] Толщина 112 слоя 105 соединения и/или аморфной части тела 102 может выбираться так, чтобы ослаблять образование пузырей, исходя из ожидаемых условий и характера излучения, которым будет облучаться тело 102. Например, может быть  
25 желательным сформировать слой 105 соединения до такой глубины от поверхности 204, которая достигает местоположения, где в противном случае произошло бы образование пузырей при ожидаемых условиях излучения. Глубина образования пузырей может зависеть от таких факторов, как тип излучения (например, протонное, ионное), энергия излучения, чистота подложки 104, тип металла подложки и другие.

[96] Варианты осуществления металлического тела 102 с заранее существующим слоем соединения лития и/или заранее существующей в основном аморфной структурой могут быть затем применены по желательному назначению без образования пузырей или практически без образования пузырей. Например, в применении для БНЗТ, где  
30 литиевая мишень 602 имеет заранее существующий слой соединения лития (аналогично фиг. 8D) и/или заранее существующую аморфную структуру (аналогично фиг. 8E), пучок протонов, имеющий энергию в диапазоне 1,9 МэВ - 3,0 МэВ (более предпочтительно в диапазоне 2,3 МэВ - 2,6 МэВ) и ток в диапазоне 1-20 мА (более предпочтительно в диапазоне 8-15 мА), может подаваться к мишени 602 в течение  
35 увеличенного периода времени без пузырения или без существенного пузырения. Увеличенный период времени может соответствовать флюенсу протонов, например, по меньшей мере  $6,3 \pm 0,6 \times 10^{20}$  р/см<sup>-2</sup>.

[97] Без ограничения этим, во многих примерных вариантах осуществления слой лития может быть 1-300 микрон в толщину, а в некоторых вариантах осуществления -  
45 между 10 и 250 микронами в толщину. Без ограничения этим, во многих примерных вариантах осуществления слой соединения лития, если он присутствует, может быть 1-500 микрон в толщину, а в некоторых вариантах осуществления - между 10 и 300 микронами в толщину, и в некоторых вариантах осуществления - между 15 и 100 микронами в толщину. Без ограничения этим, во многих примерных вариантах

осуществления аморфная часть подложки, если она присутствует, может быть 1-500 микрон в толщину, а в некоторых вариантах осуществления - между 10 и 300 микронами в толщину, и в некоторых вариантах осуществления - между 15 и 100 микронами в толщину. Без ограничения этим, во многих примерных вариантах осуществления подложка может быть по меньшей мере 100 микрон в толщину, при этом максимальная толщина зависит от применения. В некоторых вариантах осуществления подложка имеет толщину между 100 микронами и 50 сантиметрами.

[98] Различные аспекты настоящего изобретения изложены ниже, в обзоре описанных до сих пор вариантов осуществления и/или в дополнение к ним, причем акцент делается здесь на взаимосвязи и взаимозаменяемости следующих вариантов осуществления. Другими словами, акцент делается на том, что каждый признак вариантов осуществления может комбинироваться с каждым и любым другим признаком, если только явно не указано иное или иное логически невозможно.

[99] В первом наборе вариантов осуществления предложен способ функционирования лучевой системы, имеющей мишень, которая включает в себя слой лития и металлическую подложку, причем этот способ включает в себя: (а) воздействие на мишень излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и в мишени образуется множество пузырей; и (б) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и/или размере.

[100] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц представляет собой пучок протонов.

[101] В некоторых вариантах осуществления (б) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и/или размере, включает в себя воздействие на мишень при флюенсе энергии протонов по меньшей мере  $0,5 \times 10^{19}$  на квадратный сантиметр ( $\text{см}^{-2}$ ).

[102] В некоторых вариантах осуществления (б) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц до тех пор, пока количество пузырей не уменьшится на порядок величины.

[103] В некоторых вариантах осуществления на этапах (а) и (б) нейтроны испускаются с первой скоростью по меньшей мере  $1 \times 10^{12}$  нейтронов в секунду.

[104] В некоторых вариантах осуществления (а) воздействие на мишень излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и в мишени образуется множество пузырей, дополнительно содержит подачу испущенных нейтронов к пациенту-человеку.

[105] В некоторых вариантах осуществления (б) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и/или размере, дополнительно содержит подачу испущенных нейтронов к пациенту-человеку.

[106] В некоторых вариантах осуществления испущенные нейтроны производятся слоем лития в соответствии с реакцией  $p + {}^7\text{Li} \rightarrow n + {}^7\text{Be}$ .

[107] В некоторых вариантах осуществления способ дополнительно включает в себя выполнение (а) и (б) как части процедуры бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ).

[108] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц имеет форму пучка, и причем мишень подвергают воздействию излучения заряженных частиц

на этапах (а) и (b) при движении пучка по поверхности мишени в направлении, поперечном направлению распространения пучка.

[109] В некоторых вариантах осуществления (b) дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и размере.

[110] В некоторых вариантах осуществления (b) дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются только в размере.

[111] В некоторых вариантах осуществления металлическая подложка является медной. Слой лития может находиться в контакте с медной подложкой. Слой лития может быть сформирован непосредственно на медной объемной подложке.

[112] В некоторых вариантах осуществления слой лития имеет толщину в диапазоне от 1 микрона до 300 микрон.

[113] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц имеет энергию в диапазоне 1,9 МэВ - 3,0 МэВ.

[114] Во втором наборе вариантов осуществления предложен способ функционирования лучевой системы, имеющей мишень, которая включает в себя слой лития и металлическую подложку, причем этот способ включает в себя: (а) воздействие на мишень излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и в мишени образуется множество пузырей; и (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и между слоем лития и металлической подложкой образуется слой соединения лития до размера, достаточного для уменьшения множества пузырей в количестве и/или размере.

[115] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц представляет собой пучок протонов.

[116] В некоторых вариантах осуществления (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и/или размере, содержит воздействие на мишень при флюенсе энергии протонов по меньшей мере  $0,5 \times 10^{19}$  на квадратный сантиметр ( $\text{см}^{-2}$ ).

[117] В некоторых вариантах осуществления (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц до тех пор, пока количество пузырей не уменьшится на порядок величины.

[118] В некоторых вариантах осуществления на этапах (а) и (b) нейтроны испускаются с первой скоростью по меньшей мере  $1 \times 10^{12}$  нейтронов в секунду.

[119] В некоторых вариантах осуществления (а) воздействие на мишень излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и в мишени образуются множество пузырей, дополнительно содержит подачу испущенных нейтронов к пациенту-человеку.

[120] В некоторых вариантах осуществления (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и/или размере, дополнительно содержит подачу испущенных нейтронов к пациенту-человеку.

[121] В некоторых вариантах осуществления испущенные нейтроны производятся слоем лития в соответствии с реакцией  $p + {}^7\text{Li} \rightarrow n + {}^7\text{Be}$ .

[122] В некоторых вариантах осуществления способ дополнительно включает в себя

выполнение (a) и (b) как части процедуры бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ).

[123] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц имеет форму пучка, и причем мишень подвергают воздействию излучения заряженных частиц на этапах (a) и (b) при движении пучка по поверхности мишени в направлении, поперечном направлению распространения пучка.

[124] В некоторых вариантах осуществления (b) дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и размере.

[125] В некоторых вариантах осуществления (b) дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются только в размере.

[126] В некоторых вариантах осуществления металлическая подложка является медной, и слой соединения лития представляет собой соединение лития-меди.

[127] В некоторых вариантах осуществления слой лития имеет толщину в диапазоне от 1 микрона до 300 микрон.

[128] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц имеет энергию в диапазоне 1,9 МэВ - 3,0 МэВ.

[129]

[130] В третьем наборе вариантов осуществления предложен способ функционирования лучевой системы, имеющей мишень, которая включает в себя слой лития и металлическую подложку, причем этот способ сдержит: (a) воздействие на мишень излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и в мишени образуется множество пузырей; и (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и металлическая подложка переходит из кристаллического состояния в аморфное состояние, достаточное для уменьшения множества пузырей в количестве и/или размере.

[131] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц представляет собой пучок протонов.

[132] В некоторых вариантах осуществления (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и/или размере, содержит воздействие на мишень при флюенсе энергии протонов по меньшей мере  $0,5 \times 10^{19}$  на квадратный сантиметр ( $\text{см}^{-2}$ ).

[133] В некоторых вариантах осуществления (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц до тех пор, пока количество пузырей не уменьшится на порядок величины.

[134] В некоторых вариантах осуществления на этапах (a) и (b) нейтроны испускаются с первой скоростью по меньшей мере  $1 \times 10^{12}$  нейтронов в секунду.

[135] В некоторых вариантах осуществления (a) воздействие на мишень излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и в мишени образуется множество пузырей, дополнительно содержит подачу испущенных нейтронов к пациенту-человеку.

[136] В некоторых вариантах осуществления (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и/или размере, дополнительно содержит подачу испущенных нейтронов к пациенту-человеку.

[137] В некоторых вариантах осуществления испущенные нейтроны производятся слоем лития в соответствии с реакцией  $p + {}^7\text{Li} \rightarrow n + {}^7\text{Be}$ .

[138] В некоторых вариантах осуществления способ дополнительно включает в себя выполнение (а) и (б) как части процедуры бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ).

[139] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц имеет форму пучка, и причем мишень подвергают воздействию излучения заряженных частиц на этапах (а) и (б) при движении пучка по поверхности мишени в направлении, поперечном направлению распространения пучка.

[140] В некоторых вариантах осуществления (б) дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и размере.

[141] В некоторых вариантах осуществления (б) дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются только в размере.

[142] В некоторых вариантах осуществления (б) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что между слоем лития и металлической подложкой образуется слой соединения лития. Металлическая подложка может быть медной, а слой соединения лития может представлять собой соединение лития-меди. Этап (б) воздействия на мишень дополнительным излучением заряженных частиц может включать в себя воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что между слоем лития и металлической подложкой образуется слой соединения лития до глубины, которая достигает или является смежной с множеством пузырей.

[143] В некоторых вариантах осуществления слой лития имеет толщину в диапазоне от 1 микрона до 300 микрон.

[144] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц имеет энергию в диапазоне 1,9 МэВ - 3,0 МэВ.

[145] В четвертом наборе вариантов осуществления предложен способ, который включает в себя: (а) воздействие на область металлической конструкции излучением заряженных частиц так, что в области металлической конструкции образуется множество деформаций, причем металлическая конструкция содержит слой лития; и (б) воздействие на область металлической конструкции дополнительным излучением заряженных частиц так, что множество деформаций уменьшаются в количестве и/или размере.

[146] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц представляет собой пучок протонов.

[147] В некоторых вариантах осуществления (б) воздействие на область металлической конструкции дополнительным излучением заряженных частиц содержит воздействие на область дополнительным излучением заряженных частиц до тех пор, пока количество деформаций не будет уменьшено на порядок величины.

[148]

[149] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц имеет форму пучка, и причем область подвергают воздействию излучения заряженных частиц на этапах (а) и (б) при движении пучка по поверхности области в направлении, поперечном направлению распространения пучка.

[150] В некоторых вариантах осуществления металлическая подложка является медной.

[151] В некоторых вариантах осуществления слой лития находится в контакте с

медной подложкой.

[152] В некоторых вариантах осуществления металлическая конструкция является частью плазменного термоядерного реактора, и излучение заряженных частиц испускается при реакции ядерного синтеза.

5 [153] В некоторых вариантах осуществления слой лития имеет толщину в диапазоне от 1 микрон до 300 микрон.

[154] В некоторых вариантах осуществления деформации представляют собой пузыри.

10 [155] В некоторых вариантах осуществления (b) воздействие на область металлической конструкции дополнительным излучением заряженных частиц дополнительно содержит воздействие на область дополнительным излучением заряженных частиц так, что конвекционные и/или капиллярные силы уменьшают множество деформаций в количестве и/или размере.

15 [156] В пятом наборе вариантов осуществления предложен способ, который включает в себя: (a) воздействие на область металлической конструкции излучением заряженных частиц так, что в области металлической конструкции образуется множество деформаций, причем металлическая конструкция содержит слой лития; и (b) воздействие на область металлической конструкции дополнительным излучением заряженных частиц так, что между слоем лития и металлической подложкой образуется слой соединения лития до размера, достаточного для уменьшения множества деформаций  
20 в количестве и/или размере.

[157] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц представляет собой пучок протонов.

25 [158] В некоторых вариантах осуществления (b) воздействие на область дополнительным излучением заряженных частиц содержит воздействие на область дополнительным излучением заряженных частиц до тех пор, пока количество пузырей не уменьшится на порядок величины.

30 [159] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц имеет форму пучка, и причем область подвергают воздействию излучения заряженных частиц на этапах (a) и (b) при движении пучка по поверхности области в направлении, поперечном направлению распространения пучка.

[160] В некоторых вариантах осуществления металлическая подложка является медной, и слой соединения лития представляет собой соединение лития-меди.

[161] В некоторых вариантах осуществления слой лития имеет толщину в диапазоне от 1 микрона до 300 микрон.

35 [162] В некоторых вариантах осуществления деформации представляют собой пузыри.

40 [163] В шестом наборе вариантов осуществления предложен способ, который включает в себя: (a) воздействие на область металлической конструкции излучением заряженных частиц так, что в области металлической конструкции образуется множество деформаций, причем металлическая конструкция содержит слой лития; и (b) воздействие на область металлической конструкции дополнительным излучением заряженных частиц так, что металлическая подложка переходит из кристаллического состояния в аморфное состояние, достаточное для уменьшения множества деформаций в количестве и/или размере.

45 [164] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц представляет собой пучок протонов.

[165] В некоторых вариантах осуществления (b) воздействие на область дополнительным излучением заряженных частиц содержит воздействие на область дополнительным излучением заряженных частиц до тех пор, пока количество пузырей

не уменьшится на порядок величины.

[166] В некоторых вариантах осуществления излучение заряженных частиц имеет форму пучка, и причем область подвергают воздействию излучения заряженных частиц на этапах (а) и (б) при движении пучка по поверхности области в направлении, поперечном направлению распространения пучка.

[167] В некоторых вариантах осуществления металлическая подложка является медной, и слой соединения лития представляет собой соединение лития-меди.

[168] В некоторых вариантах осуществления слой лития имеет толщину в диапазоне от 1 микрона до 300 микрон.

[169] В некоторых вариантах осуществления деформации представляют собой пузыри.

[170] В некоторых вариантах осуществления (b) воздействие на область дополнительным излучением заряженных частиц дополнительно содержит воздействие на область дополнительным излучением заряженных частиц так, что между слоем лития и металлической подложкой образуется слой соединения лития.

[171] В некоторых вариантах осуществления металлическая подложка является медной, и слой соединения лития представляет собой соединение лития-меди.

[172] В некоторых вариантах осуществления (b) воздействие на область дополнительным излучением заряженных частиц дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что между слоем лития и металлической подложкой образуется слой соединения лития до глубины, которая достигает или является смежной с множеством деформаций.

[173] В некоторых вариантах осуществления (b) воздействие на область металлической конструкции дополнительным излучением заряженных частиц дополнительно содержит воздействие на область дополнительным излучением заряженных частиц так, что конвекционные и/или капиллярные силы уменьшают множество деформаций в количестве и/или размере.

[174] В седьмом наборе вариантов осуществления предложено металлическое тело, которое включает в себя: металлическую подложку; и слой, содержащий литий, связанный с металлической подложкой, причем металлическое тело было подвергнуто воздействию флюенса заряженных частиц по меньшей мере  $6,3 \pm 0,6 \times 10^{20}$  протонов на квадратный сантиметр ( $p/cm^2$ ).

[175] В некоторых вариантах осуществления металлическое тело проявляет большую стойкость к образованию пузырей, чем стойкость к образованию пузырей, проявлявшаяся перед воздействием.

[176] В некоторых вариантах осуществления металлическая подложка содержит медь.

[177] В некоторых вариантах осуществления металлическое тело дополнительно включает в себя слой соединения лития между слоем, содержащим литий, и металлической подложкой. Слой, содержащий литий, может включать в себя по меньшей мере 90% изотопа литий-7. Слой, содержащий литий, может включать в себя по меньшей мере 98% изотопа литий-7.

[178] В некоторых вариантах осуществления первая часть металлической подложки находится в аморфном состоянии. Вторая часть металлической подложки может находиться в кристаллическом состоянии, причем первая часть относительно ближе к слою, содержащему литий, чем вторая часть.

[179] В некоторых вариантах осуществления металлическое тело предназначено для применения в плазменном термоядерном реакторе.

[180] В некоторых вариантах осуществления металлическое тело предназначено для

применения в качестве нейтроногенерирующей мишени.

[181] В восьмом наборе вариантов осуществления предложено металлическое тело, которое включает в себя: металлическую подложку; и слой, содержащий литий, на металлической подложке, причем металлическое тело было подвергнуто воздействию излучения заряженных частиц так, что один или более пузырей были сначала образованы в металлическом теле излучением заряженных частиц, а затем один или более пузырей были уменьшены в размере излучением заряженных частиц.

[182] В некоторых вариантах осуществления металлическое тело проявляет большую стойкость к образованию пузырей, чем стойкость к образованию пузырей, проявлявшаяся перед воздействием.

[183] В некоторых вариантах осуществления металлическая подложка содержит медь.

[184] В некоторых вариантах осуществления металлическое тело дополнительно включает в себя слой соединения лития между слоем, содержащим литий, и металлической подложкой. Слой, содержащий литий, может включать в себя по меньшей мере 90% изотопа литий-7. Слой, содержащий литий, может включать в себя по меньшей мере 98% изотопа литий-7.

[185] В некоторых вариантах осуществления первая часть металлической подложки находится в аморфном состоянии. Вторая часть металлической подложки может находиться в кристаллическом состоянии, причем первая часть относительно ближе к слою, содержащему литий, чем вторая часть.

[186] В некоторых вариантах осуществления металлическое тело предназначено для применения в плазменном термоядерном реакторе или в качестве нейтроногенерирующей мишени.

[187] В девятом наборе вариантов осуществления предложена мишень для применения в бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ), причем эта мишень включает в себя: медную подложку; и слой, содержащий литий, на медной подложке, причем мишень была подвергнута воздействию излучения заряженных частиц так, что один или более пузырей были сначала образованы в мишени излучением заряженных частиц, а затем один или более пузырей были уменьшены в размере излучением заряженных частиц.

[188] В некоторых вариантах осуществления мишень проявляет большую стойкость к образованию пузырей, чем стойкость к образованию пузырей, проявлявшаяся перед воздействием.

[189] В некоторых вариантах осуществления литий находится в твердом виде.

[190] В некоторых вариантах осуществления литий находится в жидком виде.

[191] В некоторых вариантах осуществления мишень выполнена с возможностью генерировать нейтроны при воздействии протонным излучением со средней энергией от 1,9 до 3,0 мегаэлектронвольт (МэВ) и током в диапазоне от одного до двадцати миллиампер (мА) до тех пор, пока не возникнет флюенс протонов по меньшей мере  $0,5 \times 10^{19}$  на квадратный сантиметр ( $\text{см}^{-2}$ ) без существенного образования пузырей в медной подложке. Мишень может быть выполнена с возможностью генерировать нейтроны в соответствии с реакцией  $p + {}^7\text{Li} \rightarrow n + {}^7\text{Be}$ .

[192] В десятом наборе вариантов осуществления предложена мишень для применения в бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ), которая включает в себя: первый слой, содержащий литий; медную подложку; и второй слой, содержащий соединение лития-меди, расположенный между первым слоем и медной подложкой, причем мишень выполнена с возможностью генерировать нейтроны при воздействии протонным излучением.

[193] В некоторых вариантах осуществления мишень выполнена с возможностью генерировать нейтроны при воздействии протонного излучения без существенного образования пузырей в медной подложке.

5 [194] В некоторых вариантах осуществления мишень выполнена с возможностью генерировать нейтроны при воздействии протонным излучением со средней энергией 1,9 МэВ - 3,0 МэВ и током в диапазоне 1-20 мА без существенного образования пузырей в медной подложке.

[195] В некоторых вариантах осуществления мишень выполнена с возможностью генерировать нейтроны в соответствии с реакцией  $p + {}^7\text{Li} \rightarrow n + {}^7\text{Be}$ .

10 [196] В некоторых вариантах осуществления слой лития имеет толщину в диапазоне от 1 до 300 микрон.

[197] В одиннадцатом наборе вариантов осуществления предложена мишень для применения в бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ), которая включает в себя: первый слой, содержащий литий; и медную подложку, имеющую первую часть в аморфном состоянии, причем мишень выполнена с возможностью генерировать нейтроны при воздействии протонным излучением.

[198] В некоторых вариантах осуществления мишень выполнена с возможностью генерировать нейтроны при воздействии протонным излучением без существенного образования пузырей в медной подложке.

20 [199] В некоторых вариантах осуществления мишень выполнена с возможностью генерировать нейтроны при воздействии протонным излучением со средней энергией 1,9 МэВ - 3,0 МэВ и током в диапазоне 1-20 мА без существенного образования пузырей в медной подложке.

25 [200] В некоторых вариантах осуществления мишень выполнена с возможностью генерировать нейтроны в соответствии с реакцией  $p + {}^7\text{Li} \rightarrow n + {}^7\text{Be}$ .

[201] В некоторых вариантах осуществления первый слой имеет толщину в диапазоне от 1 до 300 микрон.

30 [202] В некоторых вариантах осуществления вторая часть медной подложки находится в кристаллическом состоянии, причем первая часть находится относительно ближе к первому слою, содержащему литий, чем вторая часть.

[203] В некоторых вариантах осуществления мишень дополнительно включает в себя слой соединения лития-меди между первым слоем и медной подложкой.

35 [204] Следует отметить, что все признаки, элементы, компоненты, функции и этапы, описанные в отношении любого приведенного здесь варианта осуществления, предусмотрены свободно комбинируемыми и заменяемыми таковыми из любого другого варианта осуществления. Если определенный признак, элемент, компонент, функция или этап описан в отношении только одного варианта осуществления, то следует понимать, что этот признак, элемент, компонент, функция или этап может  
40 использоваться с любым другим описанным здесь вариантом осуществления, если явно не указано иное. Поэтому данный абзац служит в качестве предшествующего обоснования и письменного подкрепления для включения в формулу изобретения в любое время пунктов, которые сочетают в себе признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из разных вариантов осуществления или которые заменяют признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из одного варианта осуществления признаками,  
45 элементами, компонентами, функциями и этапами из другого, даже если последующее описание не указывает в явном виде, в конкретном примере, что такие совокупности или замены возможны. Явно подтверждается, что четкое изложение каждой возможной совокупности и замены является чрезмерно обременительным, особенно с учетом того,

что допустимость каждой такой совокупности и замены будет легко понятна специалистам в данной области техники.

[205] Как использовано здесь и в прилагаемой формуле изобретения, формы единственного числа включают в себя и формы множественного числа, если контекст явно не предписывает иное.

[206] Хотя варианты осуществления допускают различные модификации и альтернативные формы, конкретные их примеры были показаны на чертежах и описаны здесь подробно. Однако следует понимать, что эти варианты осуществления не должны быть ограничены конкретной раскрытой формой, а, напротив, эти варианты осуществления подразумеваются охватывающими все модификации, эквиваленты и альтернативы, соответствующие сущности раскрытия. Более того, любые признаки, функции, этапы или элементы вариантов осуществления могут быть указаны в формуле изобретения или добавлены в формулу изобретения, как и негативные ограничения, которые определяют заявленный объем формулы изобретения теми признаками, функциями, этапами или элементами, которые не входят в пределы этого объема.

### (57) Формула изобретения

1. Способ функционирования лучевой системы, имеющей мишень, которая содержит слой лития и металлическую подложку, причем способ содержит:

(a) воздействие на мишень излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и в мишени образуется множество пузырей; и

(b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и между слоем лития и металлической подложкой образуется слой соединения лития до размера, достаточного для уменьшения количества пузырей в количестве и/или размере, путем воздействия на мишень при флюенсе протонов по меньшей мере  $0,5 \times 10^{19}$  на квадратный сантиметр ( $\text{см}^{-2}$ ).

2. Способ по п. 1, причем излучение заряженных частиц представляет собой пучок протонов.

3. Способ по п. 1, причем (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц до тех пор, пока количество пузырей не уменьшится на порядок величины.

4. Способ по п. 1, причем на этапах (a) и (b) нейтроны испускаются со скоростью по меньшей мере  $1 \times 10^{12}$  нейтронов в секунду.

5. Способ по п. 1, причем (a) воздействие на мишень излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и в мишени образуется множество пузырей, дополнительно содержит подачу испущенных нейтронов к пациенту-человеку.

6. Способ по п. 1, причем (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и/или размере, дополнительно содержит подачу испущенных нейтронов к пациенту-человеку.

7. Способ по п. 1, причем испущенные нейтроны производятся слоем лития в соответствии с реакцией  $p + {}^7\text{Li} \rightarrow n + {}^7\text{Be}$ .

8. Способ по п. 1, дополнительно содержащий выполнение (a) и (b) как части процедуры бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ).

9. Способ по п. 1, причем излучение заряженных частиц имеет форму пучка, и причем мишень подвергают воздействию излучения заряженных частиц на этапах (a) и (b) при

движении пучка по поверхности мишени в направлении, поперечном направлению распространения пучка.

10. Способ по п. 1, причем (b) дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и размере.

11. Способ по п. 1, причем (b) дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются только в размере.

12. Способ по п. 1, причем металлическая подложка является медной, и слой соединения лития представляет собой соединение лития-меди.

13. Способ по п. 1, причем слой лития имеет толщину в диапазоне от 1 микрона до 300 микрон.

14. Способ по п. 1, причем излучение заряженных частиц имеет энергию в диапазоне 1,9 МэВ - 3,0 МэВ.

15. Способ функционирования лучевой системы, имеющей мишень, которая содержит слой лития и металлическую подложку, причем способ содержит:

(a) воздействие на мишень излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и в мишени образуется множество пузырей; и

(b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и металлическая подложка переходит из кристаллического состояния в аморфное состояние, достаточное для уменьшения множества пузырей в количестве и/или размере, путем воздействия на мишень при флюенсе протонов по меньшей мере  $0,5 \times 10^{19}$  на квадратный сантиметр ( $\text{см}^{-2}$ ).

16. Способ по п. 15, причем излучение заряженных частиц представляет собой пучок протонов.

17. Способ по п. 15, причем (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц до тех пор, пока количество пузырей не уменьшится на порядок величины.

18. Способ по п. 15, причем на этапах (a) и (b) нейтроны испускаются со скоростью по меньшей мере  $1 \times 10^{12}$  нейтронов в секунду.

19. Способ по п. 15, причем (a) воздействие на мишень излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и в мишени образуется множество пузырей, дополнительно содержит подачу испущенных нейтронов к пациенту-человеку.

20. Способ по п. 15, причем (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и/или размере, дополнительно содержит подачу испущенных нейтронов к пациенту-человеку.

21. Способ по п. 15, причем испущенные нейтроны производятся слоем лития в соответствии с реакцией  $p + {}^7\text{Li} \rightarrow n + {}^7\text{Be}$ .

22. Способ по п. 15, дополнительно содержащий выполнение (a) и (b) как части процедуры бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ).

23. Способ по п. 15, причем излучение заряженных частиц имеет форму пучка, и причем мишень подвергают воздействию излучения заряженных частиц на этапах (a) и (b) при движении пучка по поверхности мишени в направлении, поперечном направлению распространения пучка.

24. Способ по п. 15, причем (b) дополнительно содержит воздействие на мишень

дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются в количестве и размере.

25. Способ по п. 15, причем (b) дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что мишень испускает нейтроны и множество пузырей уменьшаются только в размере.

26. Способ по п. 15, причем (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что между слоем лития и металлической подложкой образуется слой соединения лития.

27. Способ по п. 26, причем металлическая подложка является медной, и слой соединения лития представляет собой соединение лития-меди.

28. Способ по п. 26, причем (b) воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц дополнительно содержит воздействие на мишень дополнительным излучением заряженных частиц так, что между слоем лития и металлической подложкой образуется слой соединения лития до глубины, которая достигает или является смежной с множеством пузырей.

29. Способ по п. 15, причем слой лития имеет толщину в диапазоне от 1 микрона до 300 микрон.

30. Способ по п. 15, причем излучение заряженных частиц имеет энергию в диапазоне 1,9 МэВ -3,0 МэВ.

25

30

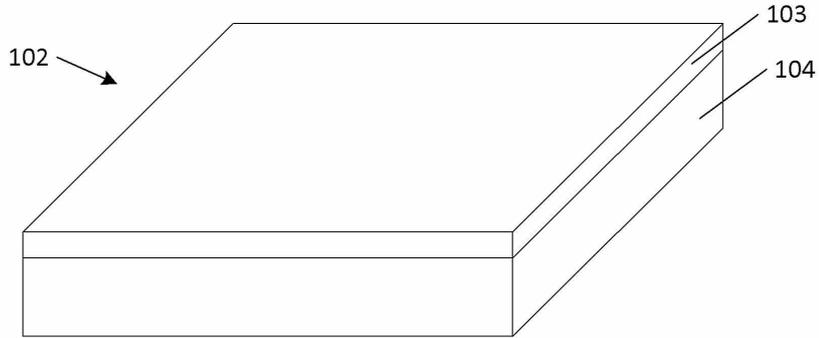
35

40

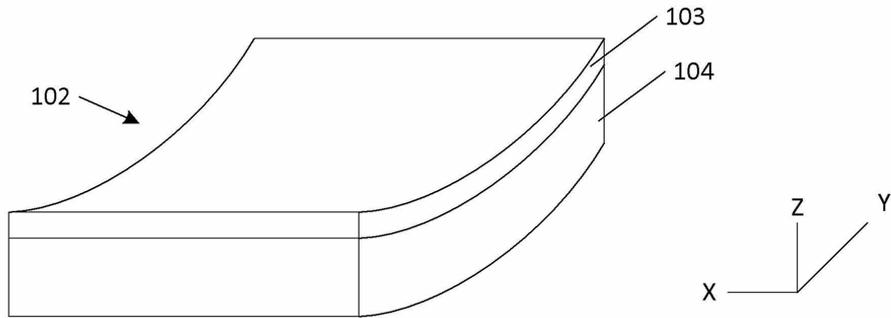
45

1

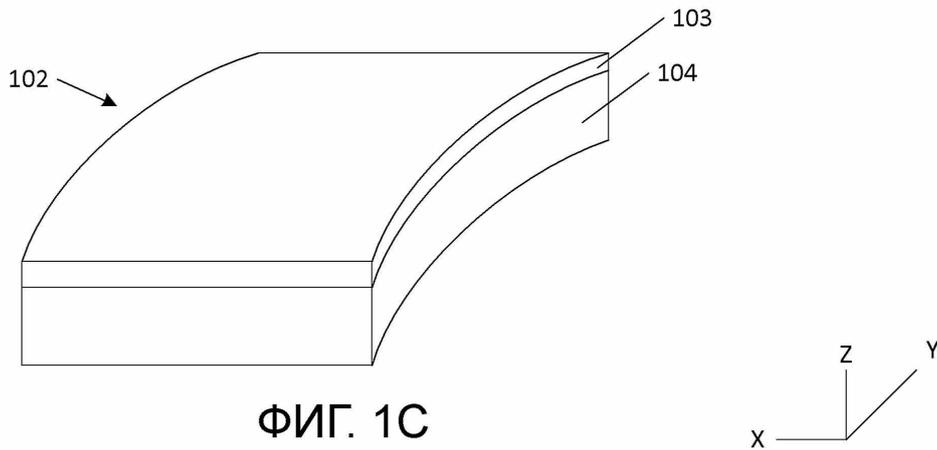
1/18



ФИГ. 1А



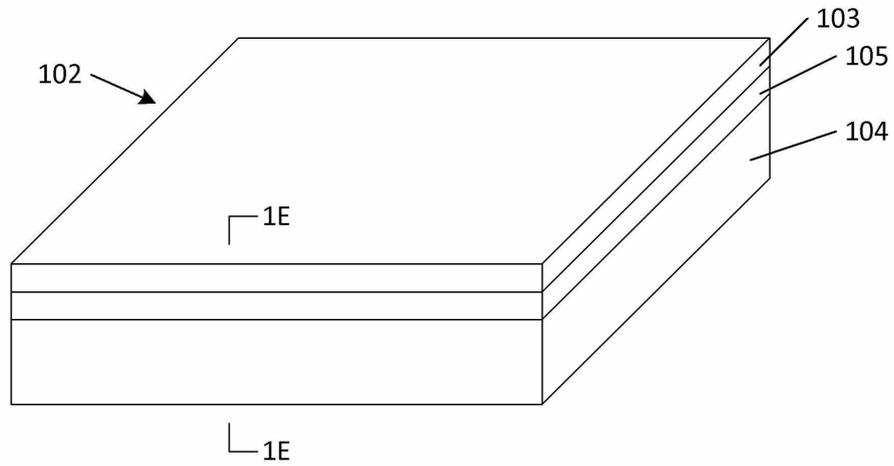
ФИГ. 1В



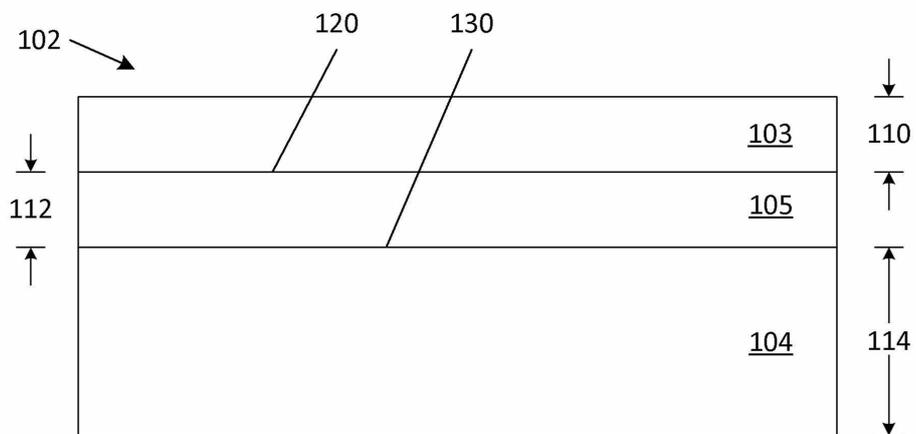
ФИГ. 1С

2

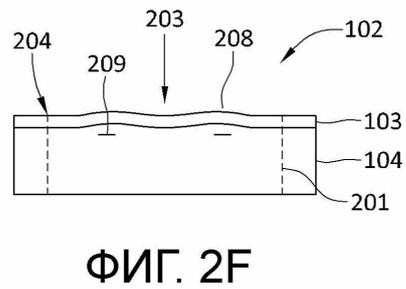
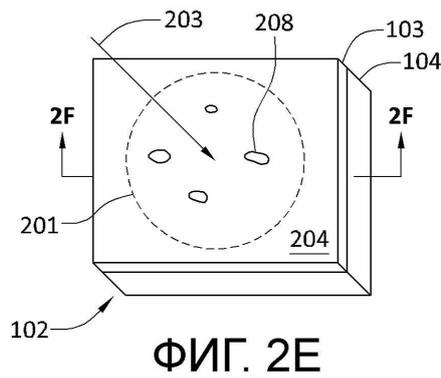
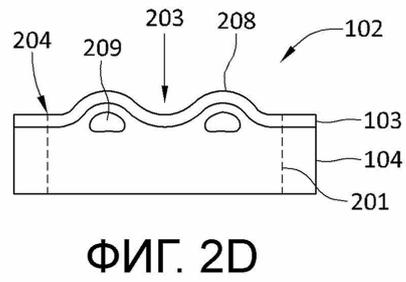
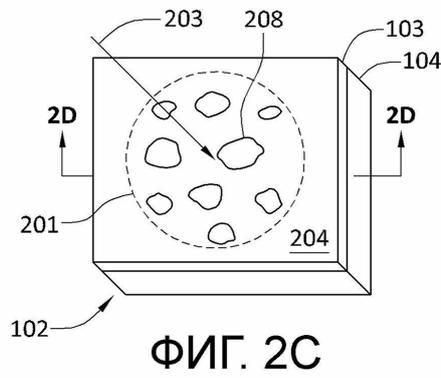
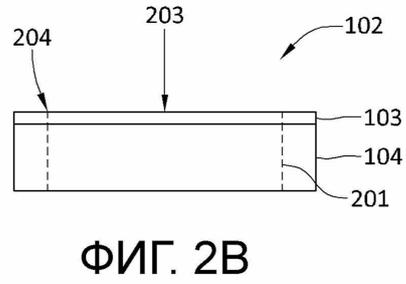
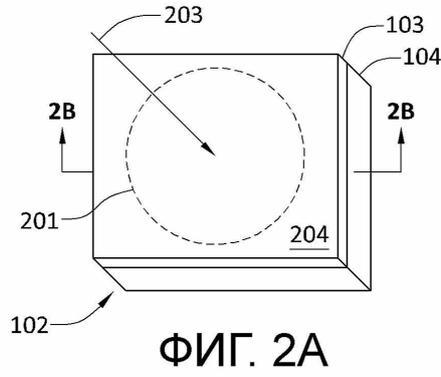
2/18



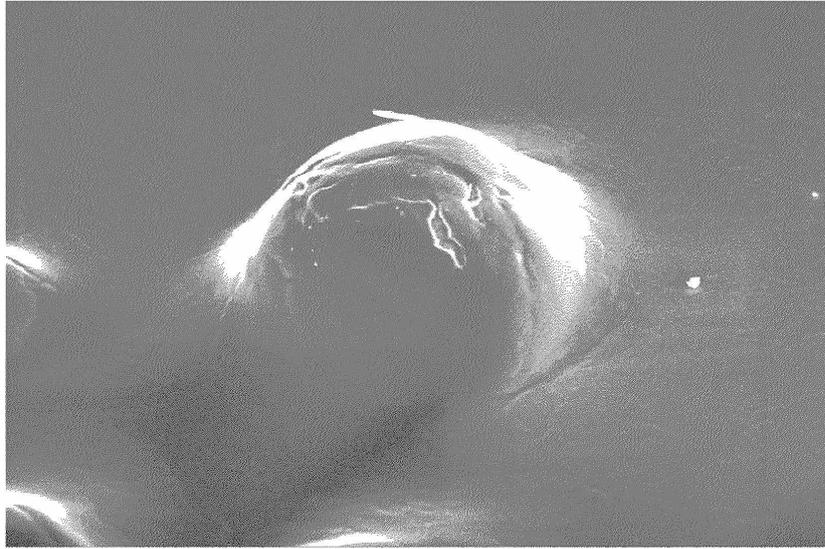
ФИГ. 1D



ФИГ. 1E

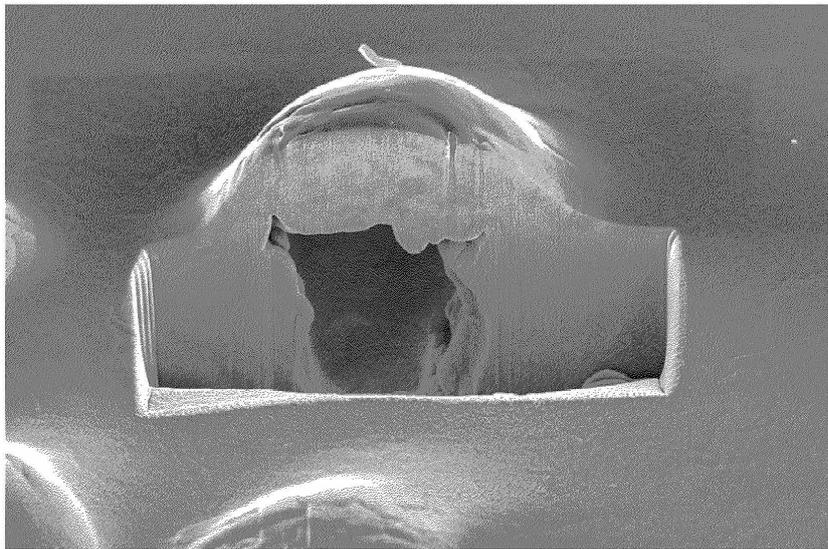


4/18



ФИГ. 2G

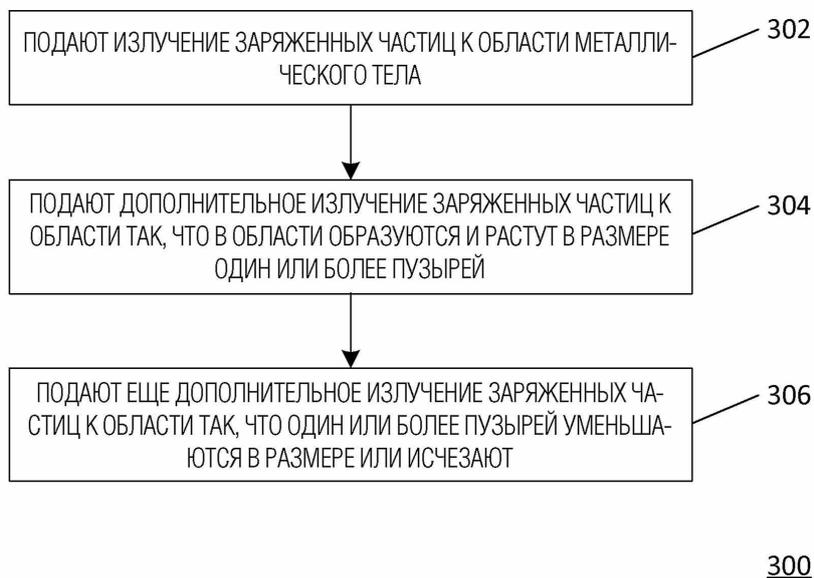
5 МИКРОН



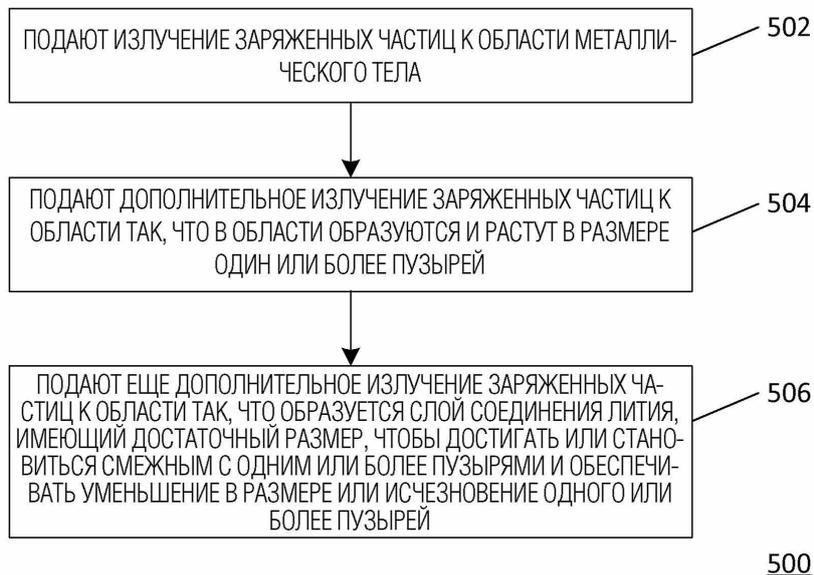
ФИГ. 2H

5 МИКРОН

5/18

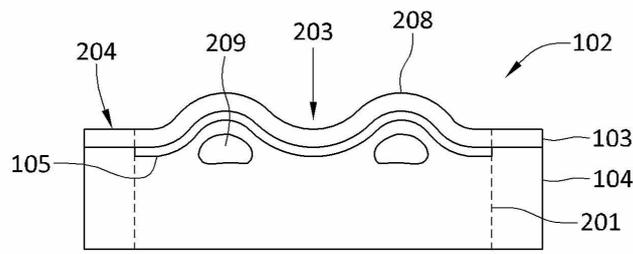
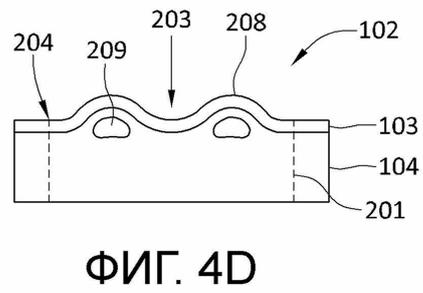
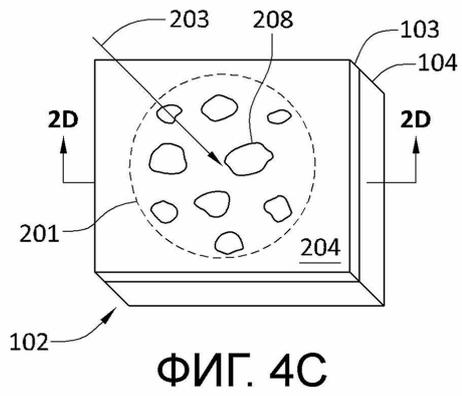
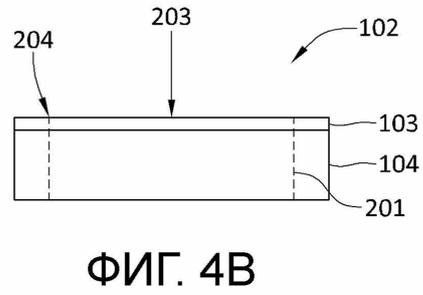
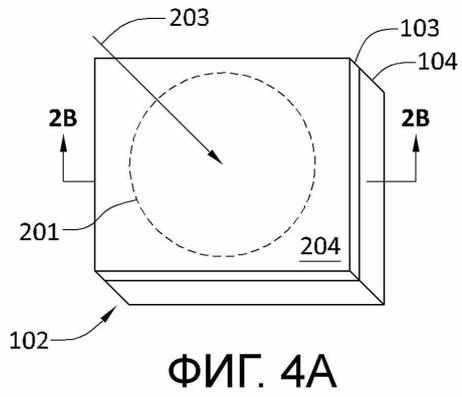


ФИГ. 3

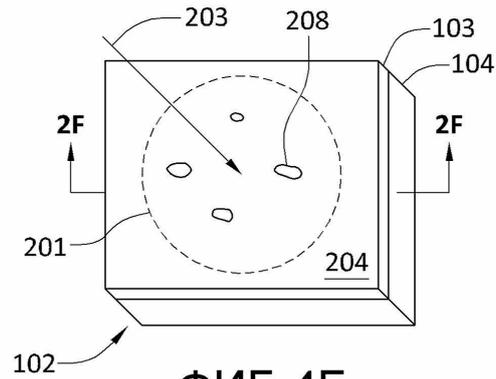


ФИГ. 5

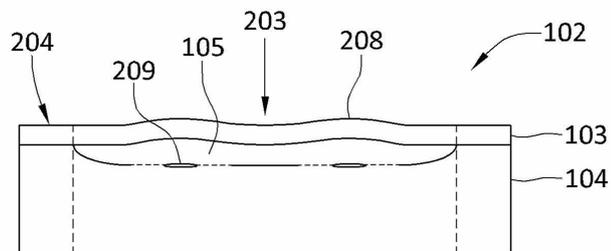
6/18



7/18

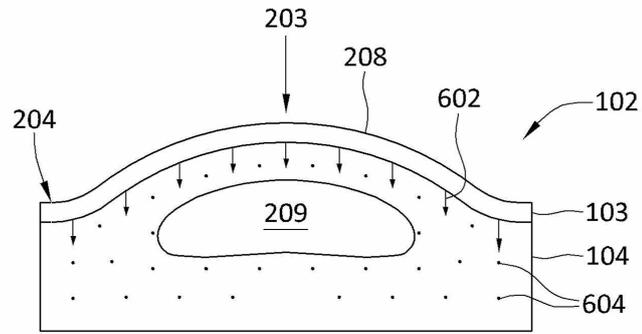


ФИГ. 4F

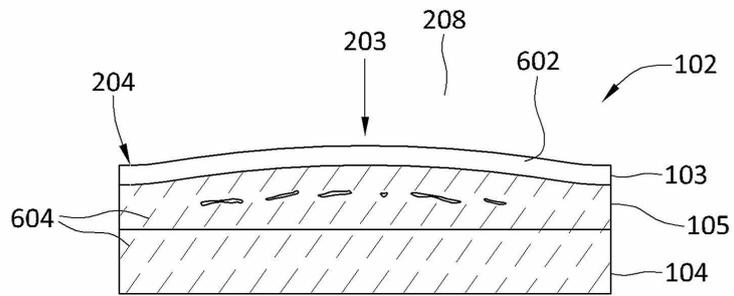


ФИГ. 4G

8/18



ФИГ. 6А



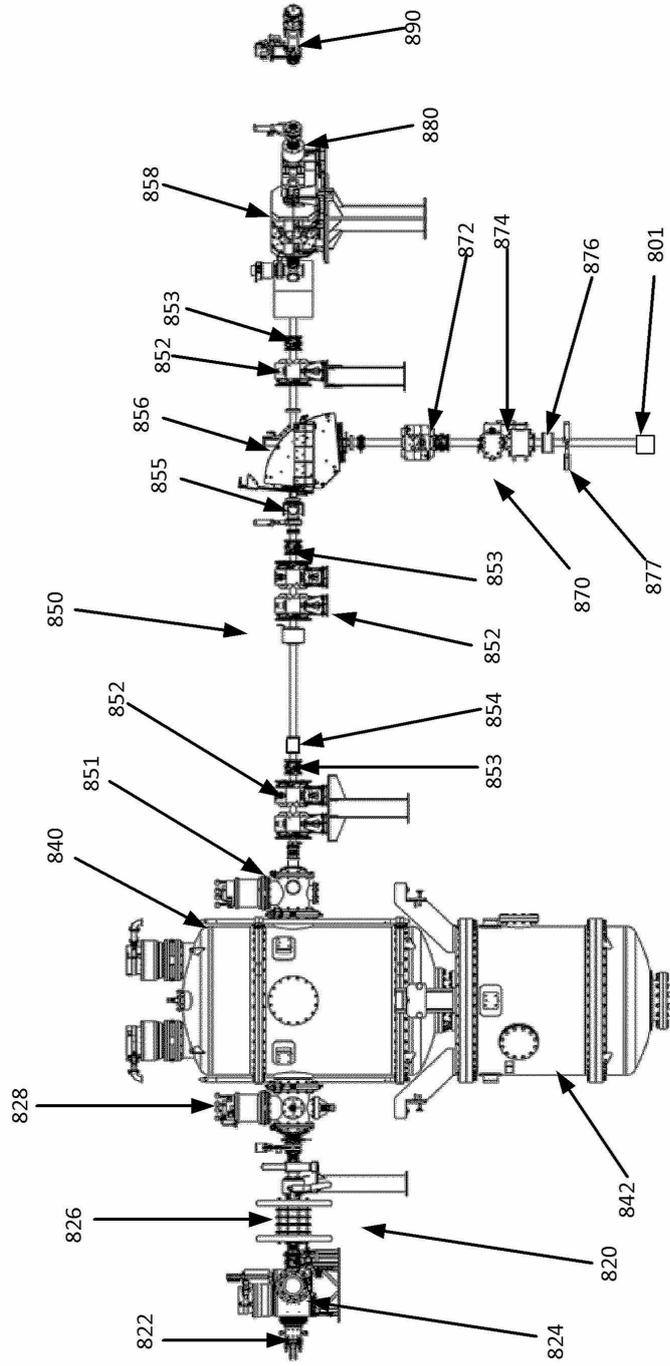
ФИГ. 6В

9/18



ФИГ. 7

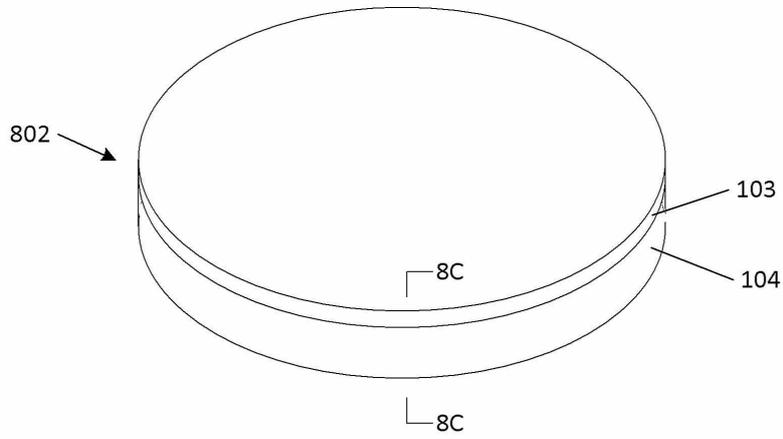
10/18



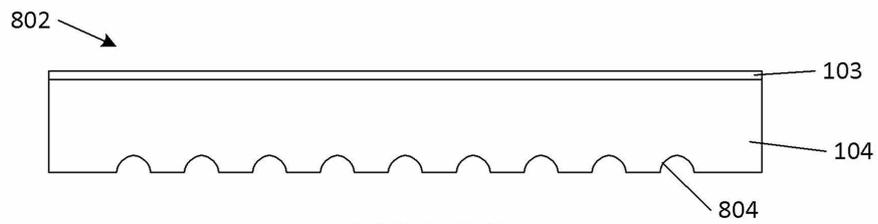
ФИГ. 8А

800

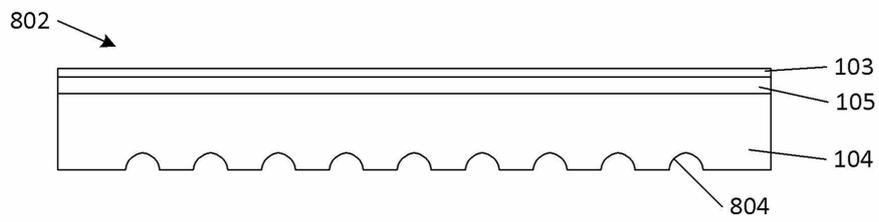
11/18



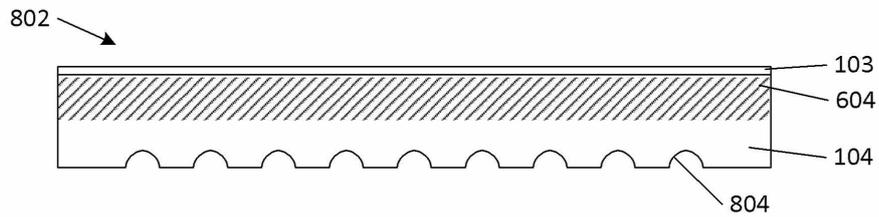
ФИГ. 8В



ФИГ. 8С

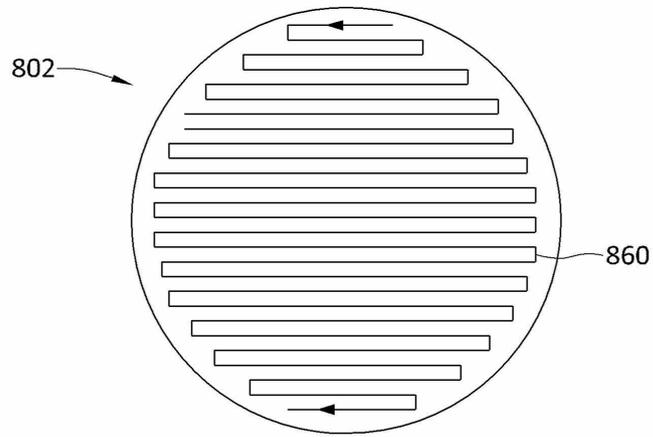


ФИГ. 8D

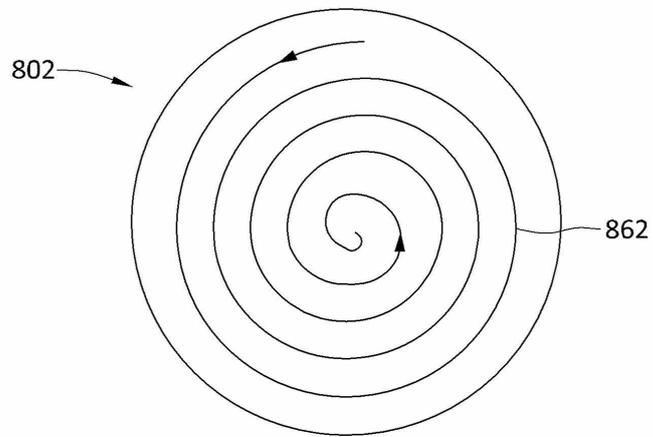


ФИГ. 8Е

12/18

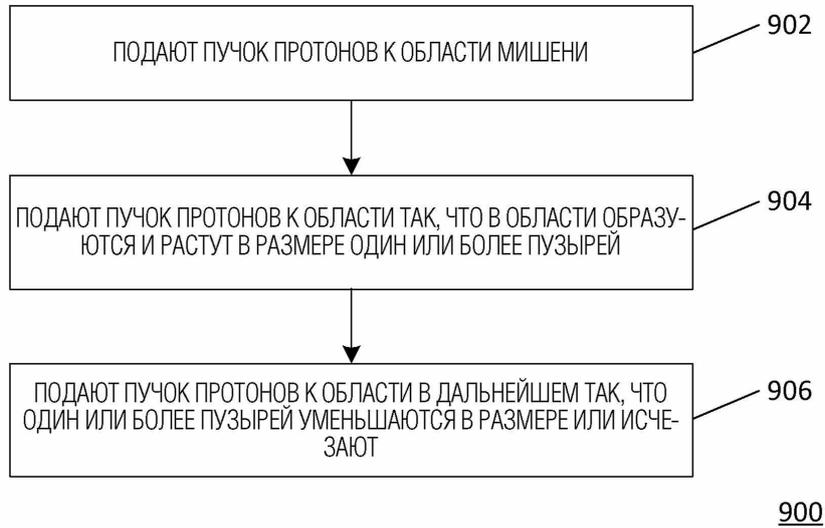


ФИГ. 8F

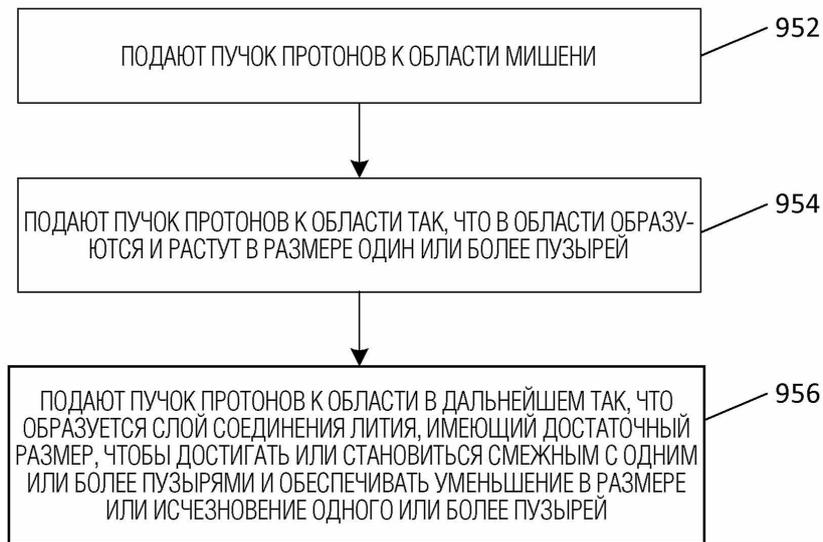


ФИГ. 8G

13/18

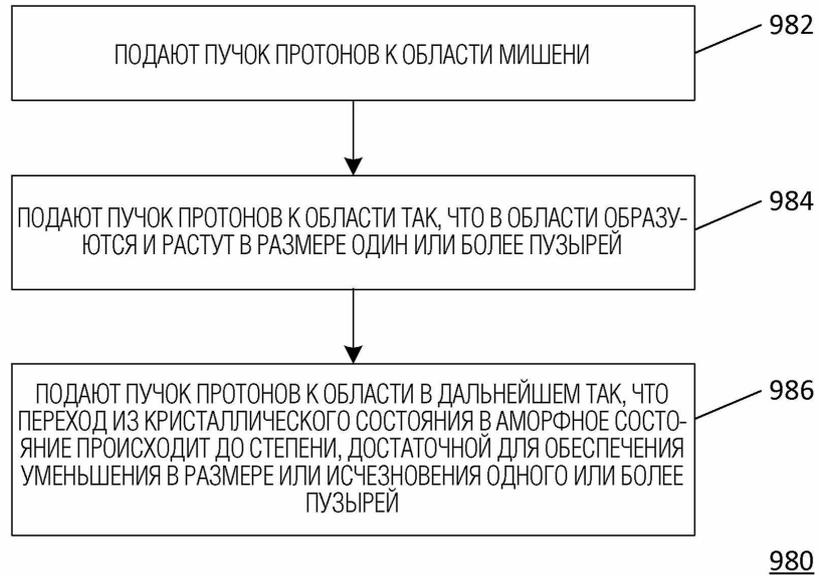


ФИГ. 9А



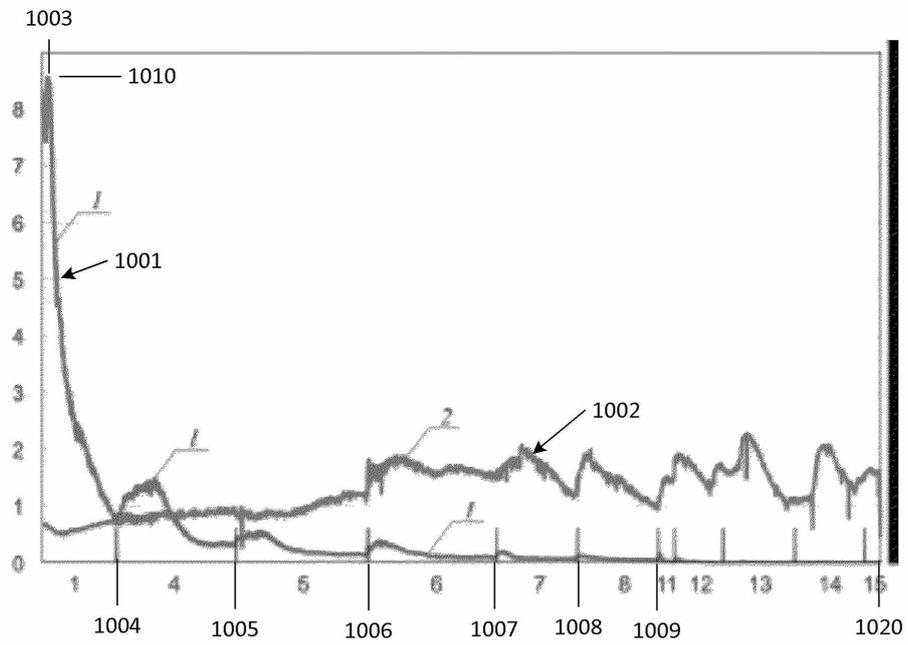
ФИГ. 9В

14/18



ФИГ. 9С

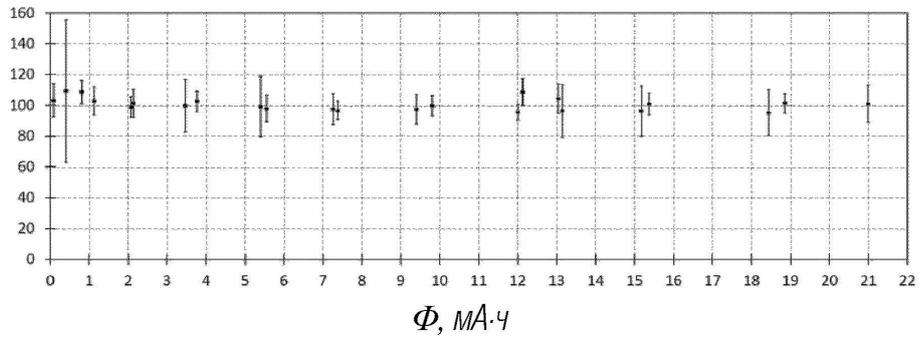
15/18



ФИГ. 10А

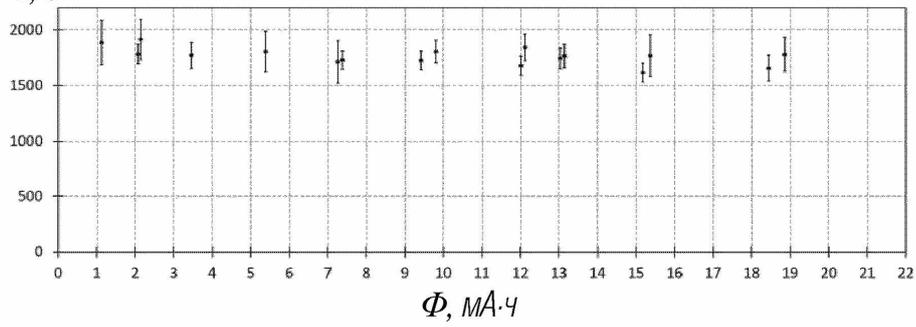
16/18

D, ПРОИЗВОЛЬНЫЕ ЕДИНИЦЫ



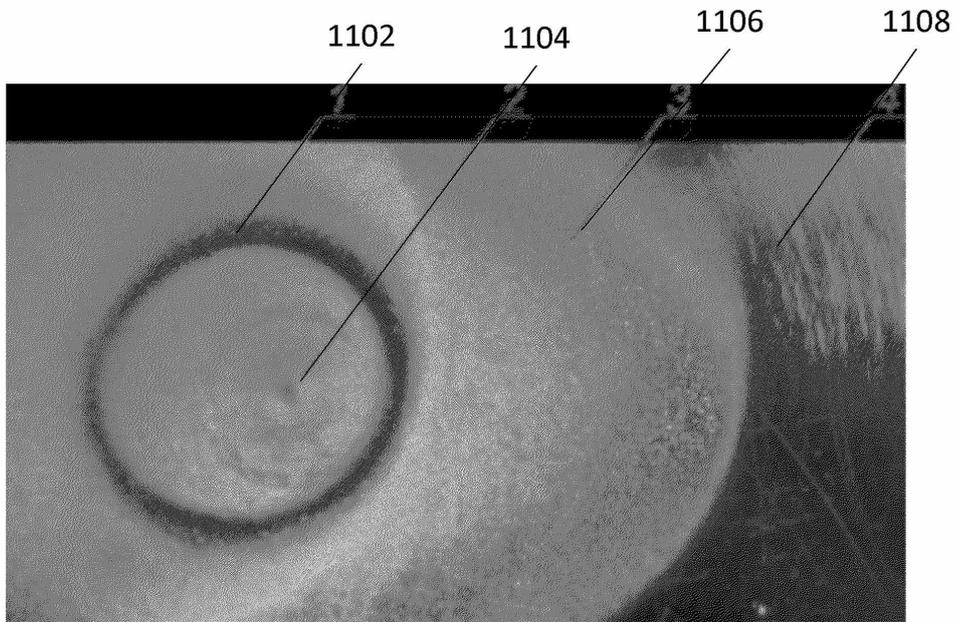
ФИГ. 10В

$Y, c^1$



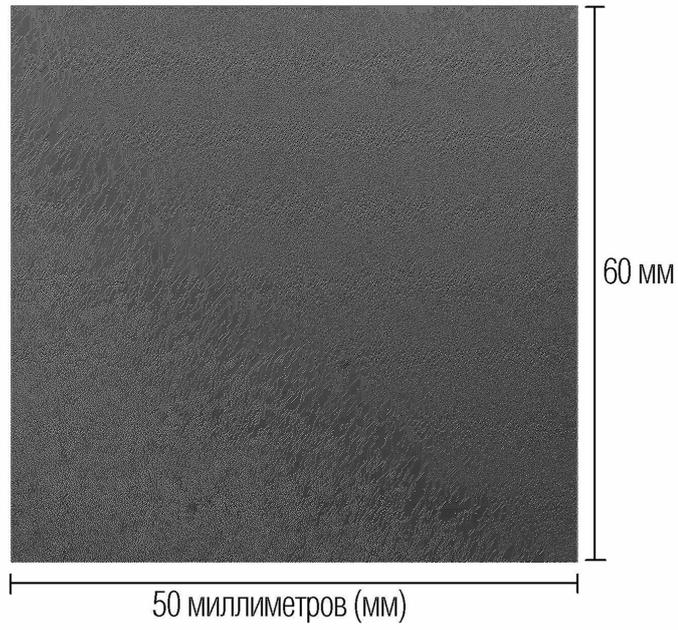
ФИГ. 10С

17/18

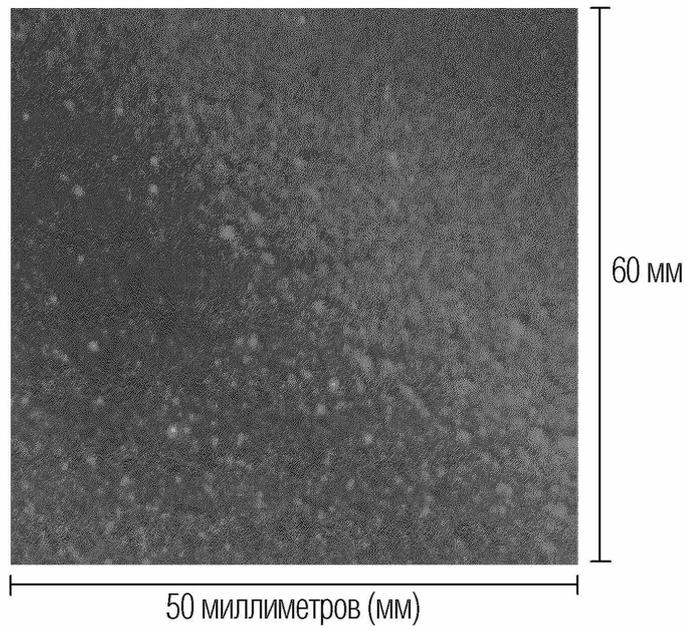


ФИГ. 11А

18/18



**ФИГ. 11В**



**ФИГ. 11С**