

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.64

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАПАЯННЫХ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК НА БАЗЕ ДИОДОВ С МАГНИТНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

© 2020 г. Р. П. Плешакова^{а, *}, А. В. Ильинский^а, А. А. Исаев^б, К. И. Козловский^б,
Е. А. Шиканов^а, А. П. Скрипник^а

^аАНО «Институт экологических, геофизических и радиационных технологий», Москва, 127434 Россия

^бНациональный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409 Россия

*E-mail: pl.regina@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.04.2020 г.

После доработки 03.07.2020 г.

Принята к публикации 06.07.2020 г.

Рассмотрены две технологические схемы, а также возможности их реализации для изготовления запаянных ускорительных трубок на базе диодов с магнитной изоляцией. Представлены схематические конструкции разрабатываемых трубок с лазерным источником дейтронов и системой подавления электронной проводимости. Для этого в вакуумный объем трубки включен достаточно термостойкий постоянный магнит. Другая конструкция трубки содержит импульсную систему подавления электронной проводимости с помощью импульсного магнитного поля, создаваемого спиралью конической формы, размещенной внутри трубки.

Ключевые слова: запаянные ускорительные трубки, магнитная изоляция, технология

DOI: 10.1134/S2079562920010091

В статье рассматриваются две технологические схемы и возможности их реализации при разработке запаянных ускорительных трубок с магнитной системой подавления электронной проводимости на базе диодной системы ускорения. Обе представленные конструкции ускорительных трубок на базе диодов с магнитной изоляцией, условно названной УТ ДМИ, схематические изображения которых показаны на рис. 1 и рис. 2, содержат лазерный источник ионов, поэтому технология их изготовления во многом похожа на технологию изготовления ранее разработанной нейтронной трубки с лазерным источником ионов, названной ЛНТ. Таким образом, рассмотрим возможность разработки технологических схем изготовления УТ ДМИ, положив в основу технологию изготовления ЛНТ. Так как принципиальное отличие между УТ с ДМИ и ЛНТ состоит только в способе подавления электронной проводимости (в ЛНТ для этой цели применялся сетчатый электрод, на который подавалось электрическое смещение), мы рассмотрим не всю технологическую схему, а только отличительные особенности технологии изготовления УТ ДМИ.

Необходимость применения магнитной изоляции для подавления электронной проводимости с помощью постоянного магнитного поля доказана в [1]. Для этой цели была изготовлена установка,

имитирующая работу ДМИ, а также постоянный магнит на основе компаунда NdFeB в форме полового цилиндра с размерами: внешний радиус — 8,5 см, высота — 4 см. Индукция B магнитного поля такого магнита составила 1 Тл. В результате эксперимента на лабораторной установке удалось уменьшить ток на мишень на 4%, а соответственно и ток высоковольтного источника. К недостаткам установки можно отнести многочисленные пробой. Авторы в [2] показали эффективность применения спирали, создающей импульсное магнитное поле для подавления электронной проводимости. Число пробоев также существенно уменьшилось. Эксперименты проводились на установке с непрерывной откачкой с лазерным источником ионов и с компактной камерой с электродной системой и введенной в межэлектродное пространство диафрагмой. Было установлено, что при использовании твердотельного лазера с длиной волны 1,06 мкм, с энергией в импульсе 0,85 Дж, длительностью импульса 10 нс и ускоряющем напряжении $U = 300$ кВ от источника высоковольтного питания, собранного по схеме Аркадьева—Маркса, была получена плотность тока 20 А/см². При пересчете на ядерную реакцию ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$ поток нейтронов должен быть $\Phi = 1,5 \cdot 10^8$ нейтронов/с при частоте повторения импульсов 1 Гц

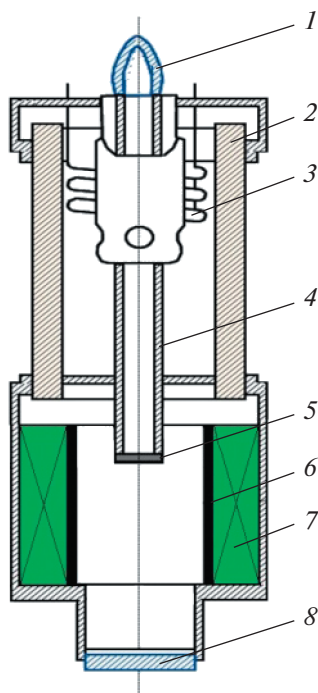


Рис. 1. Схематический разрез УТ ДМИ с постоянным магнитом: 1 — штенгель; 2 — изолятор; 3 — насос; 4 — анод; 5 — лазерная мишень; 6 — нейтронообразующая мишень; 7 — магнит; 8 — окно для ввода лазерного излучения.

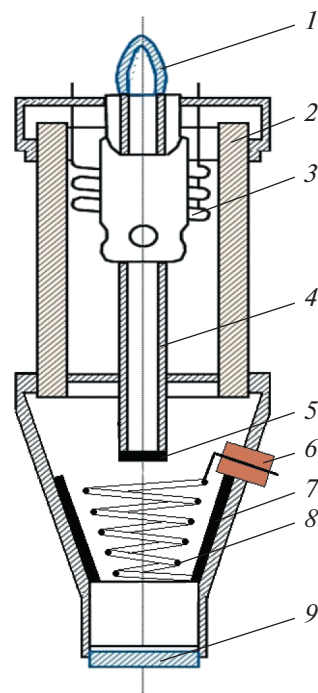


Рис. 2. Схематический разрез УТ ДМИ с импульсным магнитным полем спиральной линии: 1 — штенгель; 2 — изолятор; 3 — насос; 4 — анод; 5 — плазмообразующая мишень; 6 — электрический ввод; 7 — нейтронообразующая мишень; 8 — спираль; 9 — окно для ввода лазерного излучения.

в частотно-периодическом режиме. В случае применения установки, например, в ядерной геофизике для экспрессного определения состава горных пород методом нейтронно-активационного анализа наличие непрерывной откачки является большим недостатком. Разработка более компактного генератора нейтронов, не нуждающегося в столь мощной системе откачки, требует разработки запаянной ускорительной трубки на основе ДМИ. Для этого в вакуумный объем УТ предлагается ввести постоянный магнит (рис. 1) либо спираль, создающую импульсное магнитное поле (рис. 2).

Особенности технологии изготовления ЛНТ подробно изложены в [3]. Технология изготовления любой трубки начинается с изготовления деталей и их химической обработки. Затем следует изготовление узлов (с помощью пайки и сварки) и обязательная проверка узлов на герметичность с помощью гелиевого течеискателя. Потом идет предварительная сборка всей трубки с помощью контактной сварки. Далее проводится основная сварка (аргонно-дуговая и электронным лучом) и опять проверка на герметичность. Трубка в сборе помещается на установку откачки и отпайки. При достижении вакуума $\sim (10^{-4} - 10^{-5})$ Па проводится высоковольтная тренировка со “ступеньчатым” прогревом (по 5 мин), начиная с $T = 250^\circ\text{C}$, и по-

степенным повышением (на 50°C) до $T \sim 400^\circ\text{C}$ (данная температура сильно зависит от материала, напыляемого на подложку мишени). После повторной откачки проводят отпайку. Возникшие трудности в реальном производстве ЛНТ, такие как: наличие нейтронно-образующей мишени (М) сложной конфигурации, окна для ввода лазерного излучения в трубку и поддержание высокого вакуума во время работы трубки, были решены. Что касается поддержания вакуума, то предварительно были проведены оценки скорости откачки. По расчетам получалось, что при энергии импульса лазера 25 мДж и частоте повторения импульсов 25 Гц необходимая скорость откачки составляет ~ 10 л/с. Это могли обеспечить нераспыляемые пассивные газопоглотители типа КНТ33. Особо следует отметить технологию изготовления нейтронно-образующей мишени. Первоначально, мишень представляла собой часть корпуса ЛНТ, но как показано в [4], мишень лучше всего делать “накладной”, т.е. на дополнительную подложку из хорошего теплопроводящего материала монтируется готовая мишень. Там же показано, что трубка с такой мишенью была способна работать с частотой повторения импульсов до 100 Гц, что оправдывает усложнение технологии. Что касается окон для ввода лазерного излучения в ЛНТ с длиной волны излучения 1.06 мкм, то предпо-

чительней оказалась конструкция состоящая из диска, приваренного к втулке из того же материала, и впаянного диска из полированного вакуумного стекла такого же состава, как и вакуумно-герметичный баллон трубки.

Большой проблемой в изготовлении запаянной малогабаритной УТ на базе ДМИ является постоянный магнит, размещенный внутри вакуумного объема УТ, т.к. перед монтажом постоянного магнита в УТ он, как и все детали и узлы, должен проходить операцию термообработки при высокой температуре на вакуумном посту (не менее 300–400°C). При этом он теряет индукцию магнитного поля не менее 7%. Ранее в [5] была предложена формула и проведены расчеты оптимального значения индукции B магнитного поля в зависимости от геометрии электродов в пределах заданных габаритов трубки. Правда, магнит был расположен вне вакуумного объема трубки. Расчет показал, что величина B , необходимая для подавления электронной проводимости, лежит в пределах 100–600 мТл, что требует увеличения массы и соответственно размеров магнита, но его внешний диаметр ограничен диаметром УТ. К тому же, магниты должны быть термостойкие. Изготовление малогабаритных термостойких магнитов, размещаемых внутри УТ даже с $B = 100$ мТл, является очень сложной задачей. Однако, в [6] была предложена вакуумная нейтронная трубка (НТ), внутри источника ионов (ИИ) которой размещен постоянный магнит для увеличения стабильности работы ИИ. Это предложение было реализовано в НТ с искро-дуговым ИИ [7]. При размерах всего $25 \times 18 \times 30$ мм удалось создать магнит с индукцией магнитного поля на оси $B \sim 50$ мТл (материал 25Х15К), но после термообработки B упала до ~ 40 мТл. Несмотря на это, измерения ионного тока, нейтронного потока и срока службы НТ показало увеличение всех этих технических параметров, что вселяет уверенность в возможности реально создать наш предполагаемый вариант УТ с ДМИ. Возможен и другой путь. После всех вышеописанных процессов УТ с магнитом-заготовкой помещают в намагничивающее устройство, тщательно закрепив ее в изоляционное ложе с хорошими амортизаторами, и намагничивают. Такой способ намагничивания после отпайки трубки от откачного поста был опробован при изготовлении газонаполненной трубки с ионным источником типа Пеннинга [8].

Рассмотрим подробнее схематическое изображение УТ на рис. 1 с точки зрения технологии. Во-первых, корпус трубки придется делать составным: из чередующихся металлических и керамических цилиндров с компенсирующими кольцами, промежуточными прокладками из алюминия и титановыми электродами [9], высоковольтными выводами и мощными вводами для подачи импульсных токов ~ 1000 А на спираль (материал —

нихром), смонтированную на них внутри трубки. Штенгель для установки трубки на откачной пост должен быть металлическим, составным и изготовлен из разных металлов. Так как отпайка от откачного поста будет производиться методом диффузионной сварки, то предпочтительным материалом для наконечника коваровой втулки штенгеля является медь. Отдельно стоит проблема изготовления окна для ввода лазерного излучения. Во-первых, его надо вынести далеко от конической мишени со спиралью во избежание перегрева. Особенно это касается окон из оптического стекла. При длине волны 1.06 мкм его можно заменить на стекло марки С52-1, но при более длинных волнах излучения лазера, например, в инфракрасном диапазоне надо ставить германиевые окна. К сожалению, они еще более критичны к высокой температуре [9]. Перейдем к рассмотрению технологии изготовления нейтронно-образующей мишени, которая имеет сложную структуру и нетрадиционную форму. Как правило, она состоит из плоской металлической подложки с хорошей теплопроводностью и достаточно хорошей адгезией к напыляемому на нее металлу, который обладает повышенной термостойкостью и сорбирующими свойствами по отношению к изотопам водорода (дейтерию и тритию). В нашем случае традиционный способ напыления мишеней не годится из-за неравномерности получаемого слоя и плохой адгезии, а при насыщении изотопами водорода он будет осыпаться. Естественно, что мишень в УТ ДМИ должна быть “накладной” и смонтирована на дополнительную подложку с очень хорошей теплопроводностью. Для быстрого снижения тепловой нагрузки с активной поверхности мишени в [10] предложено ввести в вакуумную нейтронную трубку дополнительную промежуточную подложку на основе синтетического алмаза. Авторами [11] была описана установка и способ изготовления мишени сложной конфигураций с помощью лазера, но его сложно реализовать (неравномерность покрытия составила $\sim 40\%$). Теперь рассмотрим вопрос сохранения рабочего вакуума во время работы трубки в частотном режиме. Если УТ генератора нейтронов предназначена для геофизических исследований, то желательно, чтобы она работала с большой частотой, иначе трудно интерпретировать полученные после облучения образцов результаты. Лучшие результаты с трубкой ЛНТ были получены с твердотельным компактным лазером, стабильно работающим до частоты 50 Гц. Другие опробованные нами малогабаритные лазеры уже при 9 Гц работали нестабильно. Даже при меньшей частоте ни пассивные газопоглотители, ни ленточные геттеры, ни ионные насосы не справятся с задачей поддержания рабочего вакуума между импульсами внутри запаянной УТ ДМИ из-за низкой скорости откачки этих средств. Для ЛНТ была разработана конструкция со встро-

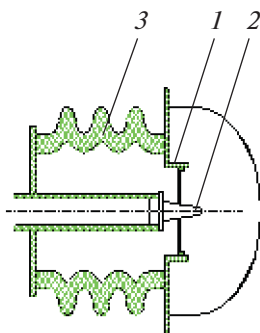


Рис. 3. Схематический разрез УТ для генерации рентгеновских квантов: 1 — катод; 2 — анод; 3 — керамический гофрированный изолятор.

енным внутри УТ миниатюрным магнитно-разрядным насосом, разработанным на основе обращенного магнетрона, но экспериментально проверить данную конструкцию не удалось. Возможно, для УТ ДМИ эта технология будет реализована.

При разработке другой технологической схемы изготовления УТ ДМИ со спиралью (рис. 2) возникла технологическая проблема ее намагничивания, т.е. подачи от автономного источника питания мощного (1000 А) импульса, создающего импульсное магнитное поле. Эту проблему можно решить чисто конструкторским путем, сделав в корпусе герметичные мощные керамические вводы, на которые будет монтироваться спираль. Итак, после всех технологических операций, традиционно необходимых при изготовлении УТ вплоть до технологического процесса сборки вакуумно-герметичного корпуса УТ, на которые монтируется спираль из нихрома, выполняются все операции, как в обычных технологических схемах, разработанных для изготовления УТ, до процесса прогрева при температуре 400°C (подложка мишени при этом должна быть напылена более термостойким щелочноземельным металлом, например, скандием) в течение 4 ч под откачкой. Потом следуют операции высоковольтной тренировки, откачки до давления $\sim 10^{-5}$ Па и отсоединение от откачного поста.

Описанный технологический опыт был использован при создании УТ нового поколения для генерации рентгеновских квантов. При эксплуатации таких импульсных генераторов рентгеновского излучения для задач геофизических исследований (особенно в полевых условиях) предъявляются повышенные требования к механической и электрической прочности УТ. Поэтому с целью повышения этих показателей было предложено использовать изолятор из специальной высоковольтной керамики, используя описанные выше технологические процессы. Предварительно были сделаны оценки геометрических размеров УТ. Путем компьютерного моделирования и физического маке-

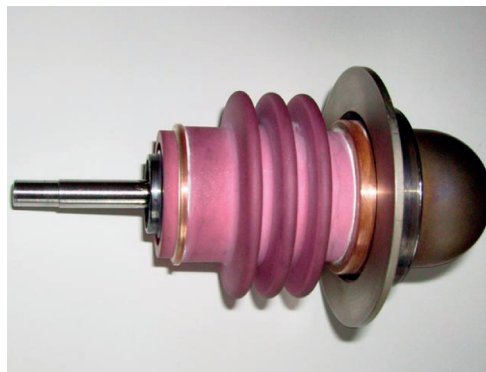


Рис. 4. Внешний вид УТ для генерации рентгеновских квантов.

тирования на разборном вакуумном стенде была получена информация об оптимальных геометрических размерах диодной ускоряющей системы [12], которая легла в основу разработки УТ рентгеновского излучения [13]. Ее схематический разрез и общий вид представлены на рис. 3 и рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сказать, что дальнейшие исследования возможности разработки технологических схем для создания герметичных ускорительных трубок на основе диодов с магнитной изоляцией уместна и перспективна.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 05.605.21.0182 (RFMEFI60519X0182).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Шиканов А.Е., Вовченко Е.Д., Козловский К.И. // Атом. энергия. 2015. Т. 119. № 4. С. 210–215.
2. Шиканов А.Е., Вовченко Е.Д., Исаев А.А., Козловский К.И., Шатохин В.Л. // Журн. техн. физики. 2017. Т. 87. № 6. С. 949–951.
3. Плешакова Р.П., Беспалов Д.Ф., Войтенко В.А., Рябов Е.В. и др. // Вopr. атом. науки и техн. Сер.: Радиационная техника. 1990. В. 1. С. 30–33.
4. Плешакова Р.П., Бессарабский Ю.Г., Курдюмов И.Г. и др. // Вакуум. техн. и технология. 2000. Т. 10. № 2. С. 63–65.
5. Анурова Н.К., Плешакова Р.П., Шиканов А.Е. и др. // Патент РФ. № 1632249, 08.12.1993. Импульсная нейтронная трубка.
6. Плешакова Р.П. // Патент РФ № 2316835, 10.02.2008. Вакуумная нейтронная трубка.
7. Плешакова Р.П., Бессарабский Ю.Г., Пресняков Ю.К. и др. // Вакуум. техн. и технология. 2003. Т. 13. № 1. С. 31–34.

8. Долгов Н.А., Дыдычкин В.Н., Плешакова Р.П. и др. // Патент РФ № 1590019, 08.12.1993. Ускорительная газонаполненная нейтронная трубка.
9. Плешакова Р.П., Бессарабский Ю.Г., Пресняков Ю.К. // Патент РФ № 2 228554, 10.05.2004. Вакуумная нейтронная трубка.
10. Войтенко В.А., Жарких А.А., Плешакова Р.П. и др. // Вопр. атом. науки и техн. Сер.: Радиационная техника. 1990. В. 1. С. 33–35.
11. Васьцкий Б.Г., Ковалев Л.К., Шишкин В.А. // Тезисы докладов ВНТ конференции “Применение лазеров в науке и технике”. Ленинград, 1980. С. 35–36.
12. Мягков Б.А., Шиканов А.Е., Шиканов Е.А. // Атом. энергия. 2009. Т. 106. № 2. С. 114–118.
13. Шиканов Е.А. // Патент РФ № 71817, 03.10.2007. Малогабаритная ускорительная трубка для генерации рентгеновских квантов.

Technological Possibilities of Realization of Sealed Accelerator Tubes Based on Diodes with Magnetic Isolation

R. P. Pleshakova^{1, *}, A. V. Ilyinskiy¹, A. A. Isaev², K. I. Kozlovskiy²,
E. A. Shikanov¹, and A. P. Skripnik¹

¹*Institute for Ecological, Geophysical, and Radiation Technologies, Moscow, 127434 Russia*

²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: pl.regina@yandex.ru*

Received April 22, 2020; revised July 3, 2020; accepted July 6, 2020

Abstract—Two technological schemes are considered, as well as the possibilities of their implementation for the manufacture of sealed accelerator tubes based on diodes with magnetic isolation. Schematic designs of tubes under development with a laser source of deuterons and an electronic conductivity suppression system are presented. To do this, a sufficiently heat-resistant permanent magnet is included in the vacuum volume of the first tube. Another design of the tube contains a pulsed system for suppressing electronic conductivity using a pulsed magnetic field created by a conical spiral placed inside the tube.

Keywords: sealed accelerator tubes, magnetic isolation, technology