

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЛИТИЕВОЙ МИШЕНИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПРОТОННЫМ ПУЧКОМ

© 2021 г. А. Н. Макаров^{a,b}, Е. О. Соколова^{a,b,*}, С. Ю. Таскаев^{a,b,**}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

* e-mail: buiya@bk.ru

**e-mail: taskaev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 15.06.2020 г.

После доработки 25.06.2020 г.

Принята к публикации 26.06.2020 г.

Представлены результаты измерения спектра люминесценции лития при его облучении пучком протонов с энергией 2 МэВ. Разработана и внедрена в эксплуатацию устойчивая к радиационному воздействию оперативная диагностика контроля положения пучка протонов на литиевой мишени, используемая при генерации нейтронов.

DOI: 10.31857/S0032816220060233

ВВЕДЕНИЕ

Для развития перспективной методики лечения злокачественных опухолей – бор-нейтронозахватной терапии [1] – в Институте ядерной физики СО РАН предложен и создан ускорительный источник эпитепловых нейтронов [2]. Генерацию нейтронов осуществляют в результате пороговой реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ путем направления на литиевую мишень пучка протонов с энергией до 2.3 МэВ и током до 9 мА, получаемого в ускорителе-тандале с вакуумной изоляцией. Помимо основного предназначения – бор-нейтронозахватной терапии, источник нейтронов применяют для измерения содержания примесей в образцах керамики, разработанных для ИТЭР [3], для измерения сечения реакции неупругого рассеяния протона на литии и планируют применять [4] для радиационного тестирования оптических волокон системы лазерной калибровки калориметра CMS для работы Большого адронного коллайдера (ЦЕРН) в режиме высокой светимости.

Необходимость обеспечения длительной стабильной генерации нейтронов требует разработки диагностических методик, отображающих в режиме реального времени актуальную информацию от разных подсистем источника нейтронов.

Нами разработана и внедрена в эксплуатацию диагностика контроля положения пучка протонов на литиевой мишени, устойчивая к радиационному воздействию.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема ускорительного источника эпитепловых нейтронов, включающего в себя ускоритель-тандал с вакуумной изоляцией 1 для получения стационарного пучка протонов с энергией до 2.3 МэВ и током до 9 мА, литиевые мишени 11, 16 для генерации нейтронов в результате пороговой реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ и систему формирования пучка нейтронов 12 для формирования направленного потока эпитепловых нейтронов, представлена на рис. 1. Литиевая мишень представляет собой медный диск, на который со стороны протонного пучка напылен тонкий слой лития (обычно 60 мкм), а с обратной стороны выполнены спиралевидные каналы для охлаждения водой. Термическое напыление лития в вакууме осуществляют на отдельном стенде.

Транспортировку пучка протонов от ускорителя до мишени на расстояние 5 м осуществляют с применением корректора 5 и поворотного магнита 6. Ток протонов измеряют и контролируют бесконтактным датчиком тока (3) NPCT (Bergoz Instrum., Франция); степень обдирки газовой обдирочной мишени ускорителя 14 – разработанным датчиком потока нейтралов [5]; положение пучка – термомпарами, вставленными внутрь охлаждаемых диафрагм 2. Развертку пучка протонов по поверхности мишени осуществляют магнитным сканером 13.

Положение и размер пучка протонов на литиевой мишени контролируют термомпарами, вставленными внутрь медного диска мишени, а при энергии протонов ниже порога генерации ней-

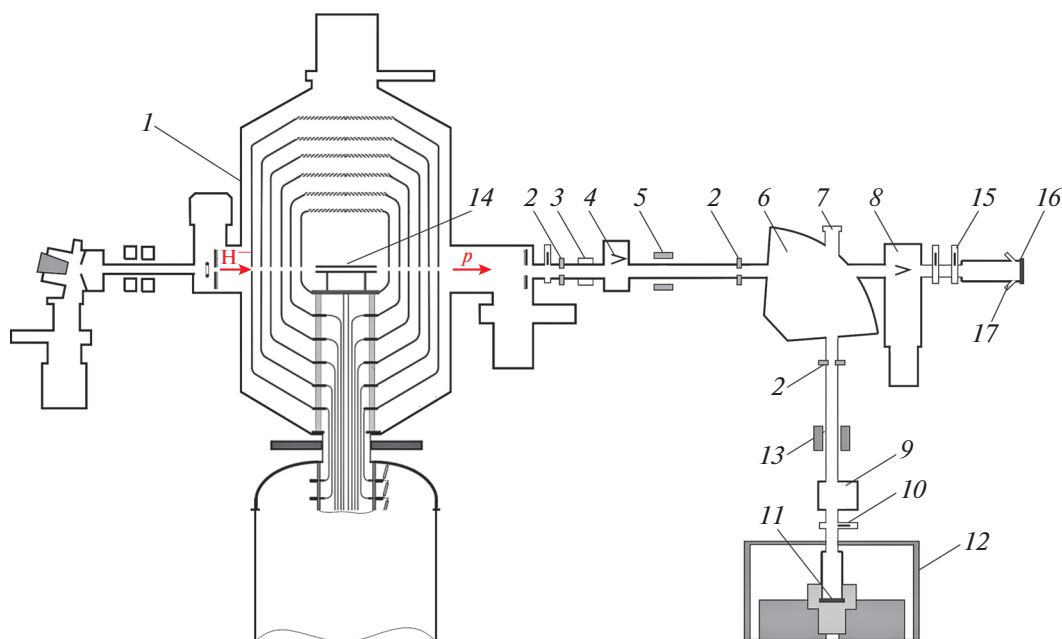


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией; 2 – охлаждаемая диафрагма с апертурой 26 мм; 3 – бесконтактный датчик тока Bergoz; 4 – диагностический бак с выдвигаемым цилиндром Фарадея; 5 – корректор; 6 – поворотный магнит; 7 – патрубок поворотного магнита с окном для наблюдения за литиевой мишенью; 8 – диагностический бак с цилиндром Фарадея и вакуумной откачкой; 9 – диагностический бак с вакуумной откачкой; 10 – шибер; 11, 16 – литиевые мишени; 12 – система формирования пучка (BSA); 13 – магнитный сканер; 14 – газовая обдирочная мишень; 15 – шибер; 17 – патрубки с окнами для наблюдения.

тронов – тепловизором Flir T650sc (США), установленным на патрубок 7 поворотного магнита с окном из фторида бария. Визуальный контроль положения пучка протонов на мишени удобен, но не применим при генерации нейтронов, так как тепловизор не может долгое время работать в потоке нейтронов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для разработки диагностики визуального контроля положения пучка протонов литиевая мишень 16 (см. рис. 1) размещена в горизонтальной части тракта транспортировки пучка протонов за поворотным магнитом, который в данном случае был выключен. На один из патрубков 17 мишенного узла, со стеклом из фторида бария, установлена видеокамера Hikvision (Китай), на второй патрубок, со стеклом из плавленого кварца, – затемненный переходник, к которому через мультимодовое кварцевое оптоволокно длиной 1 м, с диаметром сердцевины 200 мкм и числовой апертурой 0.22 NA подключен широкодиапазонный (200–1000 нм) спектрометр CCS200 Compact Spectrometer (Thorlabs, США). Для защиты от тормозного излучения ускорителя спектрометр помещен внутри свинцового коллиматора с внешним диаметром 270 мм, длиной 500 мм и толщиной стенки 50 мм.

Спектр излучения литиевой мишени, измеренный спектрометром при ее облучении пучком протонов с энергией 2 МэВ, представлен на рис. 2. Линия излучения 610.3 ± 0.5 нм соответствует электронному переходу $1s^23d \rightarrow 1s^22p$ в атоме лития, линия 670.7 ± 1 нм – переходу $1s^22p \rightarrow 1s^22s$ в атоме лития, а линия 656.3 ± 1 нм, вероятнее всего, – спектральной линии H_{α} , наблюдаемой для атома водорода.

Люминесценция лития под действием высокоэнергетичных протонов хорошо регистрируется видеокамерой. Так, на рис. 3 представлены изображения, полученные видеокамерой Hikvision при облучении литиевой мишени, присоединенной к тракту через сильфон, пучком протонов диаметром 2 мм при ее передвижении с помощью актуатора Bohua (Китай). На изображениях отчетливо видно свечение в виде светлого пятна овальной формы. Форма пятна обусловлена тем, что видеокамера смотрит на мишень под углом 45° . Визуализация пучка протонов на мишени использована при измерении пространственного распределения толщины литиевого слоя путем регистрации интенсивности излучения гамма-квантов с энергией 478 кэВ, испускаемых при неупругом рассеянии протонов на атомных ядрах лития.

На рис. 4 представлено изображение, полученное видеокамерой Hikvision, размещенной на вертикальном патрубке (7 на рис. 1) поворотного

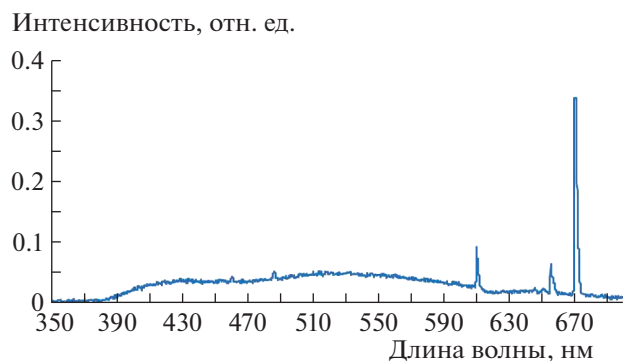


Рис. 2. Спектр люминесценции при облучении лития пучком протонов энергией 2 МэВ.

магнита и направленной на литиевую мишень, установленную в вертикальном тракте транспортировки пучка для генерации нейтронов. Светлое пятно в центре обусловлено люминесценцией лития при его облучении протонами. Данное изображение получено при выключенном магнитном сканере, предназначенном для развертки пучка протонов по поверхности мишени. При включении сканера, как и следовало ожидать, размер области свечения увеличивается.

Возможность регистрации люминесценции лития видеокамерой Hikvision позволяет контролировать положение и размер пучка протонов на литиевой мишени, в том числе и при генерации нейтронов, благодаря достаточной стойкости камеры к потоку нейтронов. Эта диагностика внедрена в эксплуатацию, и ее применяют на постоянной основе для контроля положения и размера пучка протонов на нейтроногенерирующей мишени. Ранее предполагалось использовать для этой цели тепловизор, но это возможно только при энергии протонов ниже порога генерации нейтронов, поскольку тепловизор в потоке нейтронов достаточно быстро теряет работоспособность.

Ранее, при изучении блистеринга металлов при имплантации протонов [6], нами было установлено, что тепловизор показывает завышенную температуру поверхности металла, что, по мнению авторов, обусловлено изменением коэффициента черноты поверхности металла при облучении протонами. Сейчас становится ясно, что завышение показаний температуры поверхности обусловлено люминесценцией – нетепловым свечением мишени.

Регистрация люминесценции позволила повысить достоверность результатов измерения тока пучка ионов аргона, вносящего вклад в поток вторичных заряженных частиц в ускорителе [7]. Измерения были проведены методом масс-спектрометрии с использованием поворотного магнита, внутрь которого через вертикальный патрубок 7 (см. рис. 1) был введен охлаждаемый коллиматор с отверстием 4×20 мм. Заряженные частицы, про-

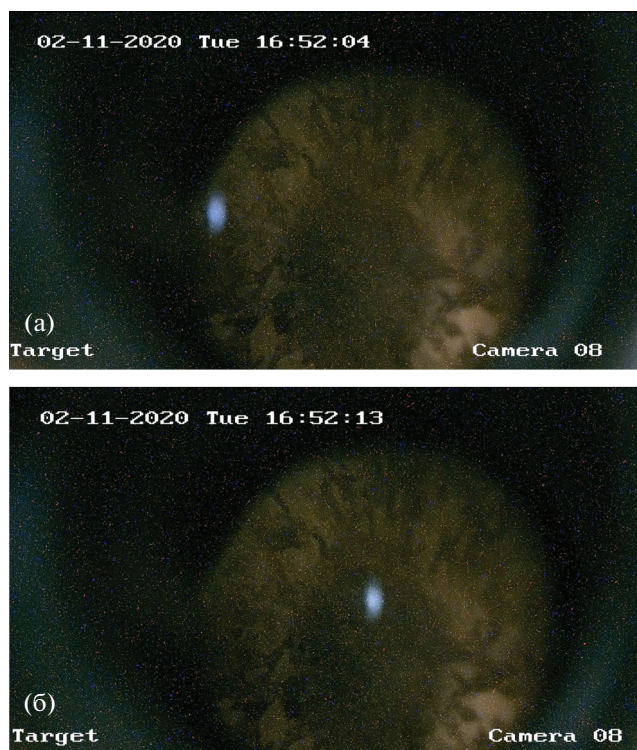


Рис. 3. Свечение, регистрируемое видеокамерой Hikvision при облучении литиевой мишени пучком протонов диаметром 2 мм при направлении протонов: а – в край мишени, б – в центр.

шедшие сквозь отверстие, попадали на литиевую мишень, электрически изолированную от установки, и генерировали ток в цепи, который измеряли.

На рис. 5 видно, что подача тока в поворотный магнит приводит к разделению компонент пучка: если нейтралы (атомы водорода) остаются на месте, то ионы аргона и протоны смещаются вниз. При некотором токе поворотного магнита пучок протонов будет попадать на коллиматор ниже ше-



Рис. 4. Свечение, регистрируемое видеокамерой Hikvision при облучении литиевой мишени пучком протонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН функционирует источник эпитепловых нейтронов, состоящий из ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией для получения пучка протонов и литиевой мишени для генерации нейтронов в результате пороговой реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$. На установке с использованием видеокамеры и спектрометра зарегистрирована люминесценция лития при облучении мишени протонами. Регистрируемая линия излучения 610.3 ± 0.5 нм соответствует электронному переходу в атоме лития $1s^23d \rightarrow 1s^22p$, линия 670.7 ± 1 нм – переходу $1s^22p \rightarrow 1s^22s$. По результатам проведенного исследования разработана и внедрена в эксплуатацию оптическая диагностика оперативного контроля положения и размера пучка протонов на поверхности литиевой мишени, используемая в режиме генерации нейтронов.

Возможность регистрации люминесценции позволила обеспечить достоверность измерения тока пучка ионов аргона, сопутствующего пучку протонов. При изучении блистеринга металла при имплантации протонов с энергией 2 МэВ люминесценция могла приводить к завышению температуры поверхности, измеряемой тепловизором.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, договор № 19-32-90119.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neutron Capture Therapy: Principles and Applications / Eds. W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa. Springer, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31334-9>
2. *Таскаев С.Ю.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46. № 6. С. 1770. <https://doi.org/10.1134/S1063779615060064>
3. *Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M., Polosatkin S., Klimenko M., Semenov A., Taskaev S., Kasatov D., Shchudlo I., Makarov A., Davydov N.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2020. V. 48. Issue 6. P. 1474. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2937605>
4. *Касатов Д.А., Кошкарев А.М., Макаров А.Н., Остреинов Г.М., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // ПТЭ. 2020. № 5. С. 5. <https://doi.org/10.31857/S0032816220050158>
5. *Колесников Я.А., Кошкарев А.М., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // ПТЭ. 2020. № 3. С. 25. <https://doi.org/10.31857/S0032816220040060>
6. *Badrutdinov A., Bykov T., Gromilov S., Higashi Y., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A., Miyazawa T., Shchudlo I., Sokolova E., Sugawara H., Taskaev S.* // Metals. 2017. V. 7. Issue 12. P. 558. <https://doi.org/10.3390/met7120558>
7. *Ivanov A., Kasatov D., Koshkarev A., Makarov A., Ostreinov Yu., Shchudlo I., Sorokin I., Taskaev S.* // Journal of Instrumentation. 2016. V. 11. P04018. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/04/P04018>

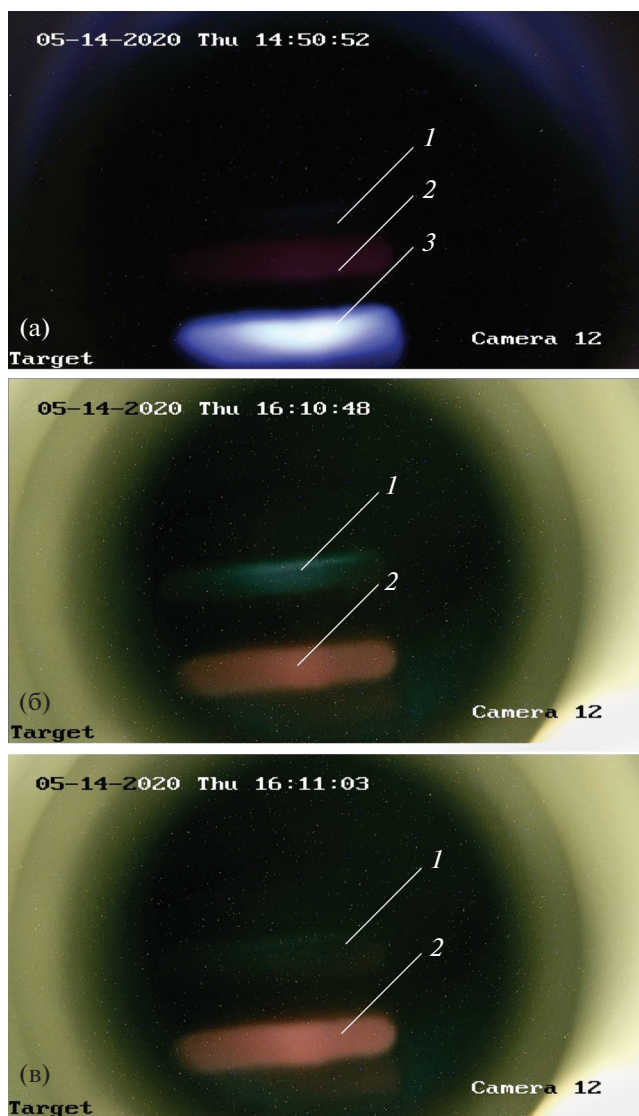


Рис. 5. Свечение, регистрируемое видеокамерой Hikvision при облучении литиевой мишени компонентами пучка заряженных частиц, при токе поворотного магнита 14 А (а), 68 А (б) и 68 А и увеличенном в 2 раза газонапуске в обдирочную мишень (в). 1 – свечение, вызванное нейтралами (атомами водорода), 2 – ионами аргона, 3 – протонами.

ли, а ионы аргона будут проходить сквозь щель, и их ток можно будет измерить. Измеряемый ток был так мал, на уровне точности измерения, что если бы не визуализация пучка аргона на литиевой мишени, то можно было бы ошибочно посчитать его нулевым. На рис. 5б видно, что через щель проходят и попадают на мишень только нейтралы и ионы аргона. При увеличении газонапуска в обдирочную мишень интенсивность свечения, обусловленная ионами аргона, возрастает, что и следовало ожидать, а интенсивность нейтралов, атомов водорода, наоборот, уменьшается, что также следовало ожидать (рис. 5в).