

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.384.6

ПРИМЕНЕНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ЭКРАНА CHROMOX ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ

© 2025 г. В. В. Куркуचेков^{а,*}, И. В. Кандауров^а, Н. Абед^а,
Д. А. Никифоров^а, Д. С. Таныгина^а

^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

* e-mail: V.V.Kurkuchekov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 23.04.2024 г.

После доработки 05.06.2024 г.

Принята к публикации 02.07.2024 г.

Сообщается о результатах применения флуоресцентного экрана из алюмооксидной керамики Chromox для измерения распределения плотности тока в поперечном сечении интенсивного импульсного электронного пучка низкой энергии. Были исследованы свойства экрана с напылением золота разной толщины: 30 и 300 нм. Покрытие толщиной 30 нм обладает хорошей проводимостью и при этом достаточной прозрачностью (около 5%) для излучения флуоресценции, что позволяет визуализировать двумерную картину распределения тока пучка с хорошим пространственным разрешением. Однако такое покрытие демонстрирует ограниченную устойчивость к воздействию пучка с током не менее 1.5 А (более 0.6 А/см²), энергией 15 кэВ, длительностью 1 мс. Покрытие толщиной 300 нм обладает значительно большей устойчивостью, но не прозрачно для излучения флуоресценции, поэтому изображение регистрировалось на просвет пластины сцинтиллятора. Такой подход позволяет получить изображение отпечатка пучка, однако с несколько худшим пространственным разрешением.

DOI: 10.31857/S0032816225010086, EDN: GHBUIW

1. ВВЕДЕНИЕ

Пучки электронов с энергией в диапазоне десятков кэВ находят применение в физическом материаловедении как инструмент моделирования импульсных тепловых нагрузок на поверхность материалов [1, 2]. В настоящее время в ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера создается экспериментальный стенд для изучения усталостной стойкости перспективных материалов облицовки дивертора и первой стенки термоядерных реакторов с магнитным удержанием под воздействием быстрых тепловых нагрузок, возникающих вследствие нестационарных процессов в горячей плазме. Для имитации теплового удара планируется использовать импульсный электронный пучок с плотностью мощности 0.1–1 ГВт/м² при длительности импульса около 1 мс и энергии электронов 10–30 кэВ, работающих в частотно-импульсном режиме [3]. Информ-

мация о распределении плотности мощности пучка на поверхности исследуемой мишени является принципиально важной в таких экспериментах.

В существующем многообразии методов измерения распределения плотности тока (плотности мощности) в падающем на мишень электронном пучке можно выделить две основные группы: а) с локальным непосредственным измерением параметров пучка; б) основанные на регистрации излучения, возникающего в результате взаимодействия электронов пучка с мишенью.

Методы первой группы используют набор (матрицу) микроколлекторов или микрокалориметров, выполняющих синхронные точечные измерения по сечению пучка [4], или используют поперечное сканирование пучка тонкой проволокой либо щелевой диафрагмой, за которой располагается коллектор [5]. К очевидным недостаткам таких методов относятся невысокое

пространственное разрешение и необходимость большого числа каналов регистрации, а в случае сканирующих диагностик — большое количество импульсов пучка, необходимое для восстановления единичного профиля.

Методы второй группы позволяют получать изображение падающего на мишень пучка с помощью рентгеновского [6], переходного [7], теплового [8] излучений, а также люминесценции материала мишени в видимом диапазоне [9]. Тип регистрируемого излучения определяется параметрами пучка и техническими возможностями эксперимента, однако применение люминесцентного экрана в качестве мишени является, пожалуй, самым простым и легко интерпретируемым методом, позволяющим за один импульс получить двумерную картину поперечного сечения пучка с хорошим пространственным разрешением.

Для диагностирования пучка с приведенными выше величинами энергии частиц, длительности и плотности мощности люминесцентный экран должен удовлетворять ряду требований:

- спектр излучения люминофора должен лежать в спектрально чувствительной области ПЗС- и КМОП-матриц;
- высокий световой отклик люминофора и его линейность в широком динамическом диапазоне;
- достаточно малое время затухания флуоресценции и отсутствие длительного послесвечения для измерения профиля пучка в последовательных импульсах;
- совместимость с условиями высокого вакуума;
- устойчивость к нагреву и тепловым ударам;
- механическая прочность и возможность изготовления экранов достаточно большого размера при разумной стоимости.

Одним из материалов, в основном удовлетворяющим этим требованиям, является Chromox — корундовая керамика с 0.5-процентной добавкой Cr_2O_3 [10]. Данный тип флуоресцентного экрана широко известен как инструмент диагностики пучков в ускорительных комплексах. Как правило, речь идет о релятивистских (от нескольких МэВ до сотен ГэВ) пучках тяжелых ионов или электронов с токами до 0.1 мА и полным зарядом, приходящим на мишень за импульс пучка, не более нескольких н·Кл [11–14]. Поскольку керамика Chromox является хорошим изолятором, ее использование для диагностики пучков электронов с энергией в диапазоне нескольких

десятков кэВ и сравнительно большим полным зарядом в импульсе (порядка 10^{-3} Кл) сталкивается с проблемой накопления заряда на мишени, что может заметно исказить регистрируемые характеристики пучка.

В нашей работе сообщаются результаты исследования возможности применения экрана Chromox с металлическим напылением для диагностики электронного пучка с энергией 10–20 кэВ, током до 2 А и длительностью около 1 мс, предназначенного для изучения стойкости различных материалов к быстрым тепловым нагрузкам.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема регистрации распределения тока электронного пучка представлена на рис. 1. Пучок генерируется пушкой с термокатодом на основе гексаборида лантана, разработанной и изготовленной в ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера. В описываемых экспериментах катод имел кольцевую форму с внешним диаметром 16 мм и внутренним — 8 мм. Высоковольтный модулятор позволял формировать импульсы пучка с током до 10 А при ускоряющем напряжении до 20 кВ

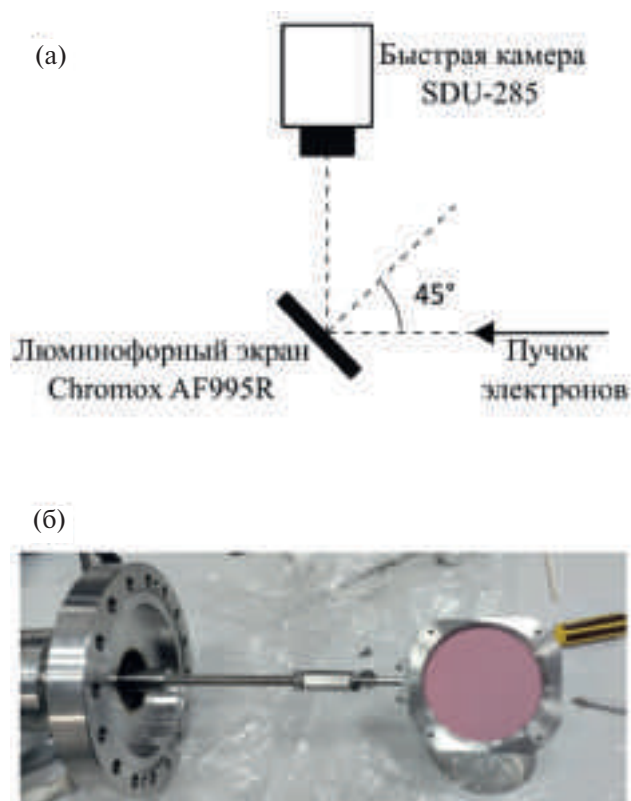


Рис. 1. а — Схема регистрации распределения тока электронного пучка с помощью флуоресцентной керамики Chromox. б — Вакуумная подвижка с закрепленным флуоресцентным экраном.

и длительностью импульса от 20 мкс и выше с частотой повторения до 100 Гц. Пучок формировался и транспортировался на мишень в осевом расходящемся магнитном поле величиной 80 мТл на катоде и около 34 мТл на мишени. Подробное описание экспериментального стенда, устройства пушки и систем питания можно найти в работе [3].

Флуоресцентный экран марки Chromox AF995R [10] производства Advantech UK Ltd. был закреплен на вакуумной подвижке под углом 45° к оси пучка на расстоянии около 20 см от катода. Экран представлял собой пластину из керамики толщиной 1 мм и диаметром 80 мм. Данный тип люминофора хорошо изучен и имеет обширную историю применения в диагностике пучков частиц. Плотность керамики равна 3.85 г/см^3 при размере зерен 10–15 мкм. Спектр люминесценции состоит из линий с длиной волны 691 нм и 694 нм со временем спада флуоресценции 3.4 мс и 6.7 мс соответственно. Керамика Chromox совместима с высоким вакуумом, хорошо переносит тепловые нагрузки, обладает высоким выходом фотонов ($5 \cdot 10^4$ фотонов/МэВ) и линейностью отклика.

Свечение экрана регистрировалось ПЗС-камерой SDU-285 [15]. Камера оснащена матрицей SONY ICX285AL с разрешением 1392×1040 пикселей размером $6.45 \times 6.45 \text{ мкм}^2$. Время экспозиции в экспериментах составляло 5 мс.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 приведены снимки свечения экрана Chromox с чистой поверхностью при различной величине ведущего магнитного поля. Пучок

имел ток около 1 А при ускоряющем напряжении 10 кВ и длительности импульса 1 мс. На снимках видно сильное искажение кольцевой формы пучка и его расплывание, обусловленное накоплением заряда на мишени. При сравнительно низких величинах ускоряющего напряжения (менее 10 кВ) на осциллограммах тока наблюдалось даже запирание тока эмиссии пушки.

3.1. Экран Chromox с напылением золота толщиной 30 нм

Для устранения эффектов, связанных с накоплением заряда на поверхности, можно использовать металлическую сетку, плотно прилегающую к флуоресцентному экрану, либо напыленную на его поверхность. Однако изображение сетки неизбежно наложится на изображение пучка и ухудшит качество получаемых данных [16]. Этого можно избежать, если нанести на люминофор тонкую металлическую пленку, которая будет обеспечивать хорошую проводимость поверхности, обладая вместе с этим достаточной прозрачностью для излучения люминофора. Пленка покрытия должна быть однородной и стойкой к химическому взаимодействию с материалом экрана.

В качестве материала такого покрытия было выбрано золото, поскольку этот металл обладает хорошей проводимостью и является одним из самых химически инертных. Толщина покрытия выбиралась, исходя из зависимости удельной проводимости пленки золота от ее толщины. Так, при толщине около 20 нм удельная прово-

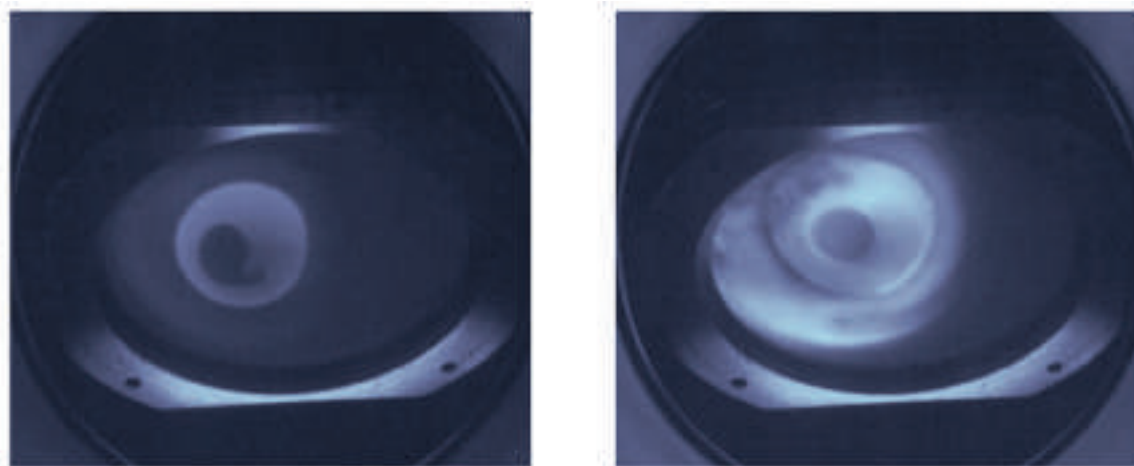


Рис. 2. Снимки свечения экрана Chromox под действием пучка электронов при различной величине ведущего магнитного поля.

димось покрытия достигает максимума и далее практически не изменяется [17].

В нашей работе толщина покрытия составила около 30 нм. Для такой пленки золота пропускание света с длиной волны 693–695 нм составляет величину около 5% [18], что обеспечивает достаточную яркость для регистрации изображения. Напыление золота проводилось термовакuumным способом, толщина пленки измерялась с помощью кремниевой пластины-свидетеля, которая располагалась рядом с напыляемым экраном. Заметим, что при толщине напыления около 30 нм и заявленной производителем зернистости керамики 10–15 мкм сложно судить о непрерывности металлического покрытия на поверхности. Для контроля проводимости сопротивление напыленной пленки измерялось мультиметром Fluke15B+. Величина сопротивления между заземленным держателем экрана и произвольной точкой на покрытии не превышала 30 Ом.

Снимок свечения пучка на экране с золотым напылением 30 нм приведен на рис. 3. Ток эмиссии здесь был равен 1 А при ускоряющем напряжении 12 кВ и длительности импульса 0.4 мс. В отличие от опытов с керамикой без напыления, отпечаток пучка имеет форму четкого кольца без искажений. Внешний диаметр отпечатка составляет 24 мм, что соответствует расчетному расширению пучка в расходящемся ведущем магнитном поле. Как можно увидеть, наряду с отпечатком пучка на снимке присутствует неоднородный фон. Он обусловлен как подсветкой экрана излучением горячего катода,

так и наличием рассеянных электронов, возникающих при отражении части электронов пучка от материала экрана.

Как известно из многочисленных литературных источников (см., например, [19]), для угла падения 45° коэффициент отражения по току электронов с энергией около 10 кэВ от алюминиевой мишени составляет величину 15–20%. При наличии ведущего магнитного поля отраженные электроны возвращаются назад на пушку, где часть из них отражается обратно потенциалом катода, а остальные частично отражаются внешними элементами конструкции пушки (нержавеющая сталь), в итоге эти дважды отраженные электроны вновь возвращаются на мишень.

Для прямого сопоставления яркости отпечатка пучка с величиной плотности тока, приходящейся на соответствующий участок изображения, зависимость светового отклика люминофора от количества частиц должна быть линейной. Подробное исследование различных люминесцентных экранов, проведенное в GSI (Центр по изучению тяжелых ионов имени Гельмгольца, Дармштадт, Германия) [20], показывает, что флуоресцентный экран Chromox обладает хорошей линейностью отклика. Однако данная характеристика измерялась на пучках ионов с энергией 295 МэВ/а.е.м. в отсутствие металлического покрытия поверхности.

Принципиальные отличия параметров пучка и наличие металлического покрытия экрана делают необходимой проверку линейности светового отклика в представляемых экспериментах. Для этого экран с золотым напылением облучался электронным пучком при различных значениях энергии частиц, тока и длительности импульса. Настройки камеры оставались неизменными на протяжении всей экспериментальной серии. Полученные результаты приведены на рис. 4.

По оси абсцисс отложено количество электронов в пучке за импульс. По оси ординат отложена интегральная яркость отпечатка пучка. Интегрирование проводилось по прямоугольной области, занятой отпечатком пучка. Размеры и положение области интегрирования были постоянными при обработке всех снимков. Экспериментальные зависимости, полученные при различных значениях ускоряющего напряжения, отложены на графике. Штриховыми прямыми показаны линейные функции, вписанные в соответствующие зависимости методом

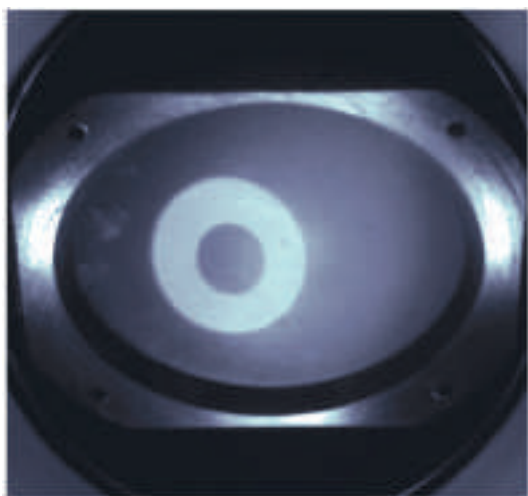


Рис. 3. Изображение отпечатка пучка на экране Chromox с золотым напылением толщиной 30 нм.

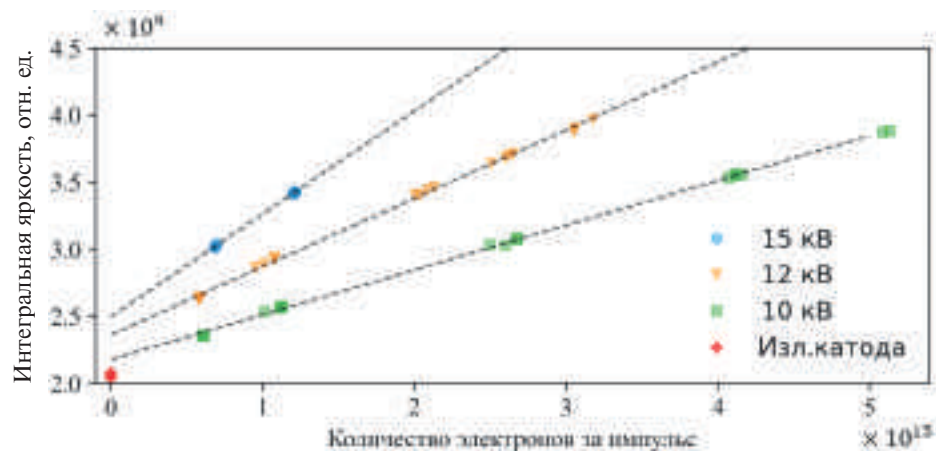


Рис. 4. Зависимость интегральной яркости отпечатков пучка от количества электронов пучка.

наименьших квадратов. Ненулевые величины яркости при нулевых значениях тока обусловлены подсветкой экрана излучением горячего катода пушки (соответствующий уровень показан на графике красным крестиком) и наличием фона от рассеянных электронов. Тем не менее световой отклик зависит от количества электронов пучка линейно.

Отметим, что в серии экспериментов по проверке линейности светового отклика флуоресцентный экран был подвергнут суммарному воздействию около 500 импульсов пучка, ток в которых не превышал 0.9 А при энергии электронов 15 кэВ и длительности импульса до 1 мс. На поверхности экрана были замечены редкие случаи пробоев, но в итоге серии ухудшения качества изображения не наблюдалось. При увеличении тока пучка до 1.5 А и выше частота и яркость

поверхностных разрядов значительно выросли (рис. 5а). Следы разрядов носили необратимый характер: проявившись, они оставались видны и на последующих снимках как светлые ломаные линии. По мере накопления этих следов качество изображения заметно ухудшилось, пример такого снимка приведен на рис. 5б. Деградация качества отпечатка сопровождалась появлением сильных шумов на осциллограммах тока пучка и частичным запирающим тока эмиссии, как это наблюдалось в случае керамики без металлического покрытия.

Всего в этой серии экспериментов экран подвергся воздействию около 50 импульсов пучка с током 1.4–2 А, при ускоряющем напряжении 13–15 кВ и длительности до 1 мс. После извлечения экрана из вакуумной камеры контрольные измерения сопротивления золотого покрытия

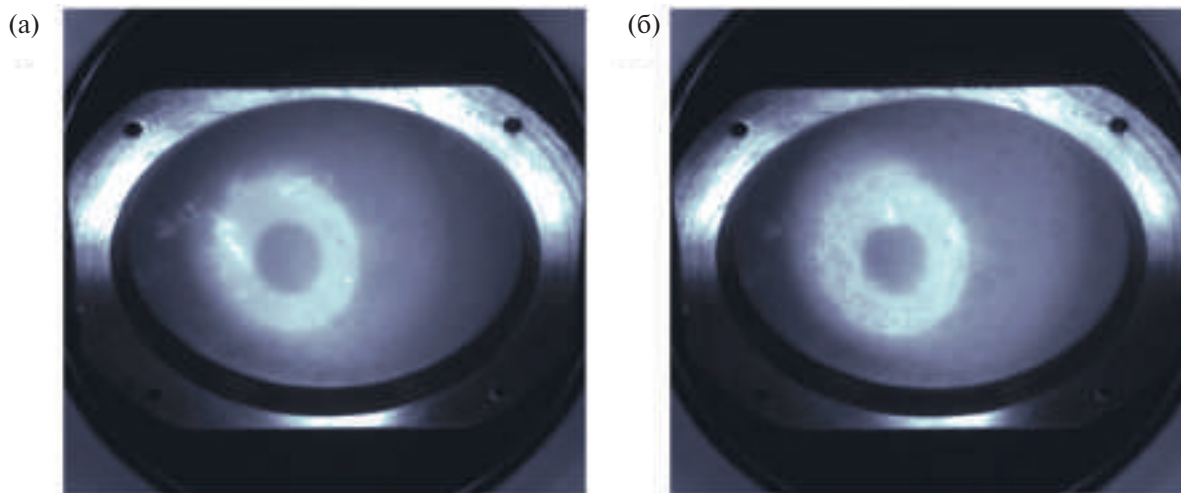


Рис. 5. а — Пример снимка разряда возникающего на поверхности флуоресцентного экрана. б — Изображение отпечатка пучка и множественных следов от разрядов после нескольких десятков импульсов.

показали его рост в 10^4 – 10^5 раз, причем наиболее сильно проводимость ухудшилась на периферии напыления в областях, не подвергавшихся прямому воздействию пучка.

3.2. Экран Chromox с напылением золота толщиной 300 нм

Нестойкость напыления толщиной 30 нм привела к решению повысить стойкость покрытия за счет увеличения его толщины. Нанесенное ранее напыление было сошлифовано абразивом, затем был напылен слой золота толщиной около 300 нм. Такое покрытие является в значительной степени прозрачным как для электронов пучка, так и для сопутствующего тормозного излучения. Так, в приближении непрерывного замедления пробег электронов с энергией 15 кэВ до полной остановки в золоте составляет примерно 750 нм [21], а коэффициент пропускания для фотонов с энергией 5 кэВ превышает 0.6 [22].

Хотя золотое покрытие такой толщины не прозрачно для спектра флуоресценции, хорошая прозрачность керамики Chromox для собственного излучения на длине волны 693 нм (коэффициент ослабления равен 8 см^{-1} [10]) позволяет регистрировать флуоресценцию на просвет пластины экрана. Внешний вид экрана с напылением и схема регистрации показаны на рис. 6. Сопротивление покрытия не превышало примерно 0.6 Ом между любыми двумя точками на поверхности.

На рис. 7 приведен пример снимка отпечатка пучка, полученного в такой конфигурации эксперимента. Как можно увидеть, контрастность



Рис. 7. Изображение свечения отпечатка пучка на обратной стороне флуоресцентного экрана Chromox с золотым напылением толщиной 300 нм.

получаемых снимков заметно улучшилась, что связано с исчезновением паразитной подсветки от горячего катода электронной пушки, а также большей прозрачностью пластины Chromox толщиной 1 мм для собственного излучения по сравнению с золотым напылением толщиной около 30 нм (коэффициенты пропускания равны соответственно 45% и около 5%). Вместе с этим конечная толщина пластины керамики приводит к некоторому размытию изображения и, следовательно, снижению пространственного разрешения диагностики.

Экран был извлечен из вакуумной камеры после примерно 100 импульсов пучка с энергией 15 кэВ, током 1.6 А и длительностью 1 мс.

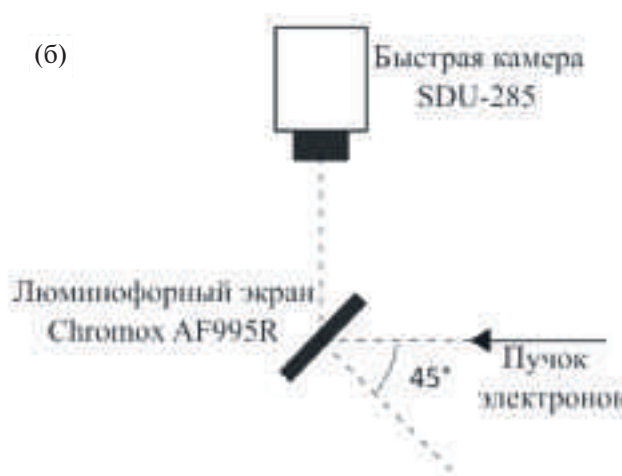
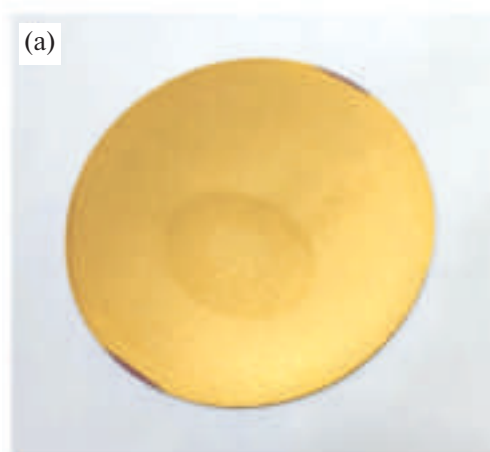


Рис. 6. а — Внешний вид флуоресцентного экрана Chromox с напылением золота толщиной 300 нм. б — Схема регистрации распределения тока пучка по излучению прошедшему сквозь пластину сцинтиллятора.

Контрольные измерения сопротивления показали, что сопротивление покрытия не изменилось по сравнению с первоначальным, до облучения пучком.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что флуоресцентный экран из алюмооксидной керамики Chromox с металлическим напылением на экране может быть успешно применен для диагностики распределения плотности тока в поперечном сечении импульсного электронного пучка с энергией 10–20 кэВ, плотностью тока на мишени 1 А/см² и длительностью около 1 мс. Керамика Chromox устойчива к термударам, производимым пучком.

2. Покрытие из золота толщиной около 30 нм, напыленное термовакуумным методом, имеет достаточную прозрачность (около 5%) к флуоресцентному излучению керамики и позволяет получать снимки с высоким пространственным разрешением, однако имеет ограниченную устойчивость к воздействию пучка. Покрытие теряет свои проводящие свойства после нескольких десятков импульсов пучка с энергией около 15 кэВ, током более 1.5 А (плотность тока на мишени около 1 А/см²) и длительностью 1 мс.

3. Рассмотрена схема измерения с золотым покрытием около 300 нм и регистрацией изображения “на просвет” флуоресцентного экрана. Напыление такой толщины оказалось значительно более устойчивым к воздействию пучка и не снизило своих проводящих качеств после примерно 100 импульсов пучка с энергией 15 кэВ, током 1.6 А и длительностью 1 мс. Такая схема измерения дает большую яркость и контрастность изображения и свободна от паразитной засветки со стороны катода пушки, но рассеяние света в материале экрана приводит к некоторому снижению пространственного разрешения диагностики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А.В. Петренко за предоставленную керамику Chromox. Авторы признательны Д.И. Сковородину и Ю.А. Труневу за полезные обсуждения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-72-00037).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Loewenhoff T., Hirai T., Keusemann S. et al.* // J. Nucl. Mater. 2011. V. 415. № 1. P. S51.
<http://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.08.065>
2. *Vyacheslavov L., Arakcheev A., Burdakov A. et al.* // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1771. № 1. 060004.
<https://doi.org/10.1063/1.4964212>
3. *Куркучев В.В., Абед Н., Иванов А.В., Кандауров И.В., Никифоров Д.А.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2024. Т. 47. № 2. С. 73.
4. *Schuch R.L., Kelly J.G.* // Rev. Sci. Instrum. 1972. V. 43. № 8. P. 1097.
<https://doi.org/10.1063/1.1685854>
5. *Forck P.* arXiv preprint arXiv:2009.10411. 2020.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.10411>
6. *Kurkuchekov V., Kandaurov I., Trunев Y.* // J. Instrum. 2018. V. 13. № 5. P05003.
<http://doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/P05003>
7. *Silva T.F., Bonini A.L., Lima R.R. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. № 9.
<https://doi.org/10.1063/1.4748519>
8. *Астпелин В.Т., Бурдаков А.В., Заболотский А.Ю. и др.* // ПТЭ. 2004. № 2. С. 66.
<https://doi.org/10.1023/B:INET.0000025201.89969.ae>
9. *Ischebeck R., Prat E., Thominet V., Loch C.O.* // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2015. V. 18. № 8. 082802.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.18.082802>
10. *McCarthy K.J., Baciero A., Zurro B. et al.* // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. № 11. P. 6541.
<https://doi.org/10.1063/1.1518133>
11. *Bal C., Bravin E., Lefèvre T. et al.* // Proceedings of DIPAC 2005. Lyon, France. 2005. P. 57. № CERN-AB-2005-067.
12. *Forck P., Andre C., Becker F. et al.* // Proceedings of DIPAC2011, Hamburg, Germany, MOPD53. P. 170.
13. *Good J., Kube G., Leuschner N. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 425. № 12. 122012.
<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/425/12/122012>
14. *Lumpkin A.H., Yang B.X., Berg W.J. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 1999. V. 429. № 1–3. P. 336.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00075-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00075-3)
15. Описание камеры.
<http://www.sptt.ru/sptt/catalog.php?l>
16. *Berg W., Ko K.* // AIP Conf. Proc. 1992. V. 281. № 1. P. 279.
<https://doi.org/10.1063/1.44348>
17. *Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В., Карпушов Е.Н.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 11. С. 102.

18. *Axelevitch A., Gorenstein B., Golan G.* // Physics Procedia. 2012. V. 32. P. 1.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.510>
19. *Goldstein J., Newbury D., Michael J. et al.* Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. New York: Springer, 2018.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>
20. *Renuka K., Ensinger W., Andre C., Beeker F., Forck P., Haseitl R., Reiter A., Walasek-Hohne B.* // BIW2012 Proceedings. Newport, VA, USA. TUPG022. 2012. P. 183.
21. *Berger M.J.* ESTAR, PSTAR, and ASTAR: Computer programs for calculating stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions. NIST. US Department of Commerce. 1992.
22. *Hubbell J.H., Seltzer S.M.* X-Ray Mass Attenuation Coefficients. NIST, US Department of Commerce, 1995.
<https://dx.doi.org/10.18434/T4D01F>