

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 553.9.07

СИСТЕМА ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ОБДИРОЧНЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ
НА ТОКАМАКЕ ИТЭР: РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ

© 2025 г. В. И. Афанасьев^{а, *}, С. С. Козловский^б, А. Д. Мельник^а,
М. И. Миронов^а, А. Н. Мокеев^с, А. С. Наволоцкий^а, В. Г. Несеневич^{а, **},
М. П. Петров^а, С. Я. Петров^а, Ф. В. Чернышев^а

^аФизико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

Российской академии наук

Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

^бСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

^сЧастное учреждение "ИТЭР-Центр"

Россия, 123060, Москва ул. Расплетина, 11, к. 2

*e-mail: val@npd.ioffe.ru

**e-mail: vnesenevich@npd.ioffe.ru

Поступила в редакцию 18.06.2025 г.

После доработки 20.08.2025 г.

Принята к публикации 15.09.2025 г.

Комплекс анализаторов атомов перезарядки входит в состав приоритетной группы диагностических систем строящегося в настоящее время токамака ИТЭР. Критическим элементом, обеспечивающим работу атомного анализатора, является обдирочная мишень – тонкая углеродная пленка толщиной 10–20 нм и диаметром 20 мм, в которой осуществляется ионизация входящего в прибор потока атомов. От ее параметров зависят эффективность регистрации частиц и точность определения соотношения концентраций топливных ионов в плазме. В статье представлены результаты разработки и испытаний системы визуального контроля, предназначенной для оперативного определения механической целостности обдирочных мишеней без нарушения вакуума. Система основана на применении радиационно стойкой видеокамеры D40M (АО “Диаконт”) и позволяет обнаруживать отдельные точечные дефекты в ячейках пленки размером 0.35×0.35 мм². Основное внимание статьи уделено вопросу радиационной стойкости элементов системы, наиболее чувствительных к интенсивному фону нейтронного излучения установки ИТЭР, – видеокамеры и светодиодов модуля подсветки обдирочной мишени. Представлены результаты облучения данных элементов пучком быстрых нейтронов с энергией

до 14 МэВ. Установлено, что видеокамера, модифицированная по результатам проведенных испытаний, и светодиоды на основе нитрида галлия после достижения значений эквивалентного по повреждениям в кремнии флюенса нейтронов с энергией 1 МэВ, равных соответственно $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и 10^{15} см^{-2} , сохраняют свою работоспособность при использовании в составе системы визуального контроля, что означает возможность функционирования системы в течение всего времени работы токамака ИТЭР.

1. ВВЕДЕНИЕ

С момента начала экспериментальных работ по управляемому термоядерному синтезу анализаторы атомов перезарядки широко используются для диагностики горячей плазмы [1]. С помощью этих приборов осуществляется регистрация потоков атомов, излучаемых из плазменного объема, что позволяет исследовать функции распределения ионов и определять изотопный состав плазмы. В энергетических термоядерных установках будущего диагностика по потокам атомов должна обеспечить контроль соотношения концентраций топливных ионов, а также получение информации об эффективности удержания α -частиц, образующихся в результате термоядерных реакций.

Принцип работы анализаторов основан на разделении атомов, поступающих из плазмы, по энергии и массе, что становится возможным после их ионизации, которая происходит в результате прохождения частиц через твердотельную или газовую мишень, устанавливаемую на входе в прибор. При высоких энергиях атомов (1 кэВ и выше) целесообразно применять твердотельную мишень. Для этого в анализаторах используются тонкие углеродные пленки, уже давно нашедшие применение в ускорительной технике [2]. В существующих плазменных установках интенсивность потоков частиц, регистрируемых атомными анализаторами, невелика в сравнении с интенсивностями пучков, получаемых на ускорителях, а длительность плазменных разрядов такова, что обычно вопрос о времени жизни пленок не возникает. Замена же пленки становится необходимой, как правило, только в случае ее механического повреждения, которое возможно, например, при нарушении условий вакуумной откачки прибора.

Проблема ограниченного ресурса твердотельной мишени в атомных анализаторах станет актуальной для термоядерных установок следующих поколений, когда интенсивность потока частиц будет достаточна для заметного распыления материала пленки за время работы на установке. Такая ситуация возникнет на экспериментальном токамаке-реакторе ИТЭР [3], строящемся в настоящее время. На данной установке в составе комплекса корпускулярной диагностики будут установлены два анализатора для регистрации атомов в тепловом (10–200 кэВ) и надтепловом (0.16–2.2 МэВ) диапазонах энергий [4]. В этих приборах будут использоваться обдирочные мишени на

основе углеродных пленок предельно малой толщины (10–20 нм), что позволит уменьшить рассеяние частиц и повысить эффективность их регистрации.

По расчетам интенсивность потока атомов дейтерия и трития, испускаемых плазмой ИТЭР, возрастает в области малых энергий и достигает наибольших значений при энергии порядка 0.1 кэВ [5]. Максимуму коэффициента распыления углеродной пленки соответствует энергия 1 кэВ [4]. Расчет показывает, что в условиях работы реактора на проектной мощности 500 МВт время распыления 20% материала пленки (по толщине) составит около $3 \cdot 10^6$ с (полное эквивалентное время работы ИТЭР равно 10^7 с). Существенное уменьшение толщины пленки приведет к тому, что нарушится состояние зарядового равновесия пучка частиц на выходе из мишени. Кроме того, снизится механическая прочность пленки и возрастет вероятность ее повреждения в результате возможных вибрационных нагрузок. Это означает, что в процессе эксплуатации анализаторов с большой вероятностью потребуется замена рабочей мишени. Сложность этой процедуры обусловлена применением массивных магнитных экранов и нейтронной защиты, окружающей приборы, из-за чего доступ к анализаторам будет затруднен. Кроме того, в дейтерий-тритиевой фазе работы реактора доступ к приборам станет невозможным из-за радиоактивности, наведенной потоком быстрых нейтронов в конструкционных материалах.

С учетом этого был разработан механизм, позволяющий осуществлять дистанционную смену пленок без нарушения вакуума внутри приборов. Механизм содержит одну рабочую и четыре запасные мишени и устанавливается в обоих анализаторах. Устройство и принцип действия механизма описаны в патенте [6].

Для контроля состояния рабочей мишени и определения необходимости ее замены было предложено использовать два метода. Один из них состоит в просвечивании пленки пучком ионов и регистрации прошедших частиц с помощью детекторного модуля анализатора [7, 8]. Система, основанная на использовании ионного источника, расположенного перед входом в анализатор, позволит отслеживать изменения эффективности регистрации прибора, вызванные любыми изменениями параметров обдирочной мишени, и на основе этих данных принимать решение о замене мишени.

Вторая система предназначена для оперативного визуального контроля состояния пленки с помощью видеокамеры. В отличие от первой, эта система не позволит судить об изменении толщины пленки или эффективности регистрации частиц, однако она даст возможность определения механической целостности мишени без длительного

вмешательства в процесс работы анализаторов, которое требуется при использовании ионного источника. Визуальный контроль может осуществляться непосредственно перед плазменным разрядом, в то время как просвечивание ионным пучком будет применяться для детального анализа состояния пленки во время технологических пауз в работе ИТЭР.

Настоящая статья посвящена описанию конструкции и результатов испытаний системы визуального контроля качества обдирочных мишеней. Главное внимание уделено радиационным испытаниям элементов системы: жесткие радиационные условия ИТЭР диктуют особые требования к электронным устройствам, устанавливаемым в реакторном зале. В разд. 2 представлены схема и состав системы визуального контроля, а также приведены результаты, полученные в ходе ее испытаний по определению количества точечных дефектов в пленке. В разд. 3 обсуждается проблема радиационного фона на токамаке ИТЭР, а в разд. 4 подробно описана методика радиационных испытаний видеокамеры и светодиодной подсветки. Обсуждается проблема моделирования радиационных условий ИТЭР и соответствия им условий эксперимента. В разд. 5, 6 приведены результаты радиационных испытаний, а в Заключение сделаны выводы о перспективах применения разработанной системы в составе комплекса атомных анализаторов на токамаке ИТЭР.

2. УСТРОЙСТВО СИСТЕМЫ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Назначение системы визуального контроля состоит в том, чтобы получить изображение обдирочной мишени, по которому можно будет сделать вывод о ее целостности либо идентифицировать наличие повреждений и определить их локализацию. Обдирочная мишень – это углеродная пленка, нанесенная на мелкоструктурную сетку (размер ячеек примерно $0.35 \times 0.35 \text{ мм}^2$) и закрепленная в металлической оправке (рис. 1). Хотя сетка и снижает оптическую прозрачность мишени, она служит для повышения прочности и устойчивости нанесенной пленки к механическим нагрузкам. В случае локального внешнего воздействия повреждения пленки могут быть ограничены несколькими ячейками и не распространятся в виде трещин по всей ее поверхности. Система визуального контроля должна обеспечивать возможность обнаружения точечных дефектов в пленке при их наличии.

Рис. 1.

Поскольку на токамаке ИТЭР доступ к анализаторам будет ограничен, важным требованием является возможность удаленного управления системой. Получение изображения должно происходить без нарушения вакуума, а сама система должна быть достаточно компактной для размещения внутри магнитных экранов и нейтронной защиты анализаторов. Для регистрации изображения можно использовать фото- или видеокамеру. Основное требование, предъявляемое к ней, – это стойкость к воздействию потоков фонового нейтронного и γ -излучений.

Схема системы визуального контроля показана на рис. 2. Рабочая мишень располагается на оси вакуумного канала, по которому проходит пучок атомов, входящий в анализатор. Для получения изображения мишени необходим источник света – он размещается перпендикулярно оси канала. Свет, излучаемый источником, перенаправляется на мишень. При этом чтобы избежать появления бликов или засвечивания, мы использовали не зеркало, а рассеивающий экран, перемещаемый на ось канала с помощью вакуумного ввода движения. Изображение пленки в рассеянном свете на фоне экрана фиксируется камерой, которая, как и источник света, размещается перпендикулярно оси канала. В данном случае для того, чтобы направить свет, прошедший через пленку, на камеру, используется зеркало. Для фокусировки света на светочувствительном элементе камеры перед ней устанавливается линза, а также диафрагма, служащая для повышения глубины поля и резкости изображения.

Рис. 2.

Трехмерная модель системы приведена на рис. 3. Для применения в составе системы была выбрана радиационно стойкая видеокамера D40M производства компании “Диаконт” [9]. Камера является частью телевизионной системы STS-40M, в состав которой входит также блок удаленного управления. Источником света служат светодиоды (модуль подсветки), размещенные на общей плате перед смотровым вакуумным окном, которое устанавливается на патрубке, закрытом от внешнего света. Эта защита необходима, поскольку в атомных анализаторах в качестве детекторов используются фотоэлектронные умножители, чувствительные к световому излучению.

Рис. 3.

Рассеивающий экран совмещен с блоком сменных диафрагм анализатора, которые при штатной работе устанавливаются перед входом в прибор и определяют его апертуру, – это позволяет использовать один общий ввод перемещения: для получения

изображения пленки на ось пучка выдвигается рассеивающий экран, а для проведения измерений потоков атомов – выбранная диафрагма.

Зеркало, направляющее прошедший через пленку свет на фокусирующую линзу и видеокамеру, перемещается на ось канала с помощью вакуумного ввода, устанавливаемого на отдельном патрубке. Необходимость применения фокусирующей линзы с установленной перед ней диафрагмой обусловлена тем, что штатный объектив камеры D40M не позволяет получить изображение пленки с требуемым увеличением. Для работы камеры в составе системы визуального контроля он демонтируется. Специальный держатель, в котором устанавливается оптическая линза, обеспечивает ее точное позиционирование при настройке.

Для проверки возможностей системы визуального контроля был собран макет и проведены его испытания. На рис. 4 представлено полученное изображение пленки. На изображении видны светлые точки – это ячейки, в которых пленка была намеренно повреждена, их количество равно 20. Разрешение видеокамеры составляет 600 телевизионных линий, и при проецировании изображения пленки на всю светочувствительную область размер одной ячейки соответствует 10 линиям, что достаточно для получения качественного изображения. Таким образом, система визуального контроля выполняет свою основную функцию – позволяет оперативно сделать вывод о структурной целостности пленки. Для получения изображения требуется несколько минут, которые затрачиваются на дистанционное включение видеокамеры и подсветки, а также установку рассеивающего экрана и отражающего зеркала на оси вакуумного канала с помощью вакуумных вводов движения, которые также управляются дистанционно.

Рис. 4.

3. РАДИАЦИОННЫЙ ФОН НА ТОКАМАКЕ ИТЭР

ИТЭР – термоядерная установка, работа которой в дейтерий-третиевой фазе будет характеризоваться высоким фоном нейтронного и γ -излучений. Интенсивность излучения быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ составит около 10^{20} с^{-1} при потоке нейтронов на первой стенке реактора $10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [10]. Для максимального снижения потока нейтронов в реакторном зале в местах размещения измерительной аппаратуры будет применяться нейтронная защита. Особенностью корпускулярной диагностики, основанной на анализе потоков атомов, является наличие прямого вакуумного канала,

соединяющего анализаторы с плазменным объемом. Вместе с атомами по этому каналу будут беспрепятственно проходить нейтроны и γ -кванты. Рассеиваясь на стенках канала, они будут распространяться в направлении, перпендикулярном его оси, повышая фоновое излучение в месте установки анализаторов и диагностической аппаратуры.

Электронное оборудование, в котором применяются полупроводниковые устройства, наиболее чувствительно к воздействию фонового излучения. Элементы системы визуального контроля, в состав которых входят электронные компоненты, – видеокамера и светодиодная подсветка – находятся в непосредственной близости от вакуумного канала. Согласно расчетам, выполненным с помощью кода MCNP [11], при работе реактора на мощности 500 МВт интегральный поток нейтронов в месте установки камеры составит $1.5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а в месте установки подсветки будет равен $7.6 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Соответствующие расчетные энергетические спектры нейтронного излучения приведены на рис. 5. Поток нейтронов будет сопровождаться потоком сопутствующих γ -квантов того же порядка величины.

Рис. 5.

С учетом высокого уровня радиационного фона для применения в системе визуального контроля была выбрана именно радиационно стойкая видеокамера. Использование активных электронных компонентов в ее составе сведено к минимуму – основная часть электроники вынесена в блок удаленного управления. Благодаря применению видикона в качестве светочувствительного элемента радиационная стойкость видеокамеры D40M к γ -излучению на два-три порядка превышает стойкость приборов на основе ПЗС-матриц (она достигает $2 \cdot 10^8$ рад [9]). Расчеты показывают, что значение суммарной поглощенной дозы в месте размещения камеры на токамаке ИТЭР будет существенно ниже (примерно 10^4 рад). В этих условиях основная радиационная нагрузка на электронику видеокамеры будет создаваться нейтронами, флюенс которых будет достигать величины 10^{14} см^{-2} .

Нейтронное излучение вносит существенный вклад в радиационные повреждения полупроводниковых материалов, во-первых, путем смещения атомов и образования дефектов в кристаллической решетке, а во-вторых, из-за ионизации вещества, происходящей при торможении ядер отдачи и тяжелых заряженных частиц (протонов, α -частиц). Эти частицы образуются в ходе ядерных реакций в том случае, если энергия быстрых нейтронов превышает соответствующие пороговые значения. Взаимодействие

рожденных заряженных частиц с атомами кристаллической решетки также может приводить к образованию дефектов.

Таким образом, для определения радиационного ресурса видеокамеры в условиях, приближенных к условиям ИТЭР, потребовалось провести дополнительные испытания на пучке быстрых нейтронов. Они были необходимы и для выбора светодиодов подсветки: в данном случае было принято решение использовать обычные коммерчески доступные светодиоды.

4. МЕТОДИКА РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Облучение видеокамеры и светодиодов происходило на циклотроне МГЦ-20 НТК "Ядерная физика" СПбПУ. Для получения нейтронов с энергией, близкой к 14 МэВ, использовалась реакция ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$: толстая бериллиевая мишень облучалась пучком дейтронов, ускоренных до энергии 9 МэВ. В результате данной реакции образуется поток нейтронов широкого энергетического спектра с максимальной энергией, складывающейся из энергии дейтронов и положительной энергии выхода реакции, равной 4.36 МэВ. Источник нейтронов такого типа подробно исследован в ряде работ (см., например, [12–15]): получены эмпирические соотношения для нейтронного выхода в направлении оси пучка дейтронов в зависимости от энергии и тока пучка, угловые распределения выхода нейтронов, а также энергетические спектры нейтронов для различных энергий дейтериевого пучка, в том числе и близких к 9 МэВ. Эти данные использовались при проведении испытаний для определения потока и флюенса нейтронов. При планировании эксперимента ожидаемый поток нейтронов определялся по эмпирическим формулам [12–14]. Облучение происходило до получения заданного заряда на бериллиевой мишени. Для независимого контроля флюенса нейтронов применялся никелевый детектор-свидетель, устанавливаемый непосредственно на облучаемом оборудовании. Флюенс нейтронов с энергией выше пороговой энергии реакции $\text{Ni}^{58}(n, p)\text{Co}^{58}$ (около 2 МэВ) определялся путем измерения активности облученного детектора с учетом энергетических зависимостей потока нейтронов и сечения реакции, а также продолжительности облучения. По полученному значению оценивалась величина полного флюенса нейтронов с энергией выше 0.4 МэВ: $\Phi_n(E_n > 0.4 \text{ МэВ}) \approx 1.3 \cdot \Phi_n(E_n > 2 \text{ МэВ})$ [12].

Следует отметить, что спектр быстрых нейтронов, в поле которых происходило облучение на циклотроне, значительно более жесткий, чем ожидается на токамаке ИТЭР в местах установки видеокамеры и светодиодной подсветки. Степень

радиационного воздействия нейтронов определяется их способностью к образованию структурных дефектов в веществе (характеризуется параметром жесткости или кермой смещения [16]), а также вторичного излучения и ядер отдачи, вызывающих ионизацию и приводящих к накоплению поглощенной дозы (характеризуется ионизационной кермой). Сравнение спектров по средней энергии, параметру жесткости и значению ионизационной кермы в кремнии приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение спектра нейтронов, образованных в реакции ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$ при $E_d = 9$ МэВ, с расчетными нейтронными спектрами в местах расположения видеокамеры и светодиодной подсветки на токамаке ИТЭР

Нейтронный спектр	Средняя энергия, МэВ	Параметр жесткости	Керма в кремнии на единичный флюенс нейтронов, 10^{-12} Гр·см ²
Реакция ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$, $E_d = 9$ МэВ	3.5	1.3	1.6
ИТЭР, в месте расположения видеокамеры	0.45	0.4	0.3
ИТЭР, в месте расположения подсветки	0.69	0.5	0.46

Параметр жесткости для нейтронов рассматриваемых энергетических спектров был рассчитан с использованием табулированных значений функции образования дефектов в кремнии [17]. Использование данного параметра позволяет сравнить нейтронные излучения с различными энергетическими спектрами по их воздействию, приводящему к образованию в веществе структурных дефектов, при заданном флюенсе: для этого рассчитывается эквивалентный по повреждениям в кремнии флюенс нейтронов с энергией 1 МэВ:

$$\Phi_{\text{экв}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ}) = k \cdot \Phi_n,$$

где k – параметр жесткости, Φ_n – флюенс нейтронов заданного спектра.

Таким образом, из данных табл. 1 следует, что при одинаковом флюенсе нейтроны, которыми облучалось оборудование на циклотроне, производят в кремнии в 2.5–3 раза больше дефектов, чем будут производить нейтроны в месте установки оборудования на токамаке ИТЭР.

Значения ионизационной кермы, приведенные в табл. 1, рассчитаны на основе данных работы [18]. При облучении нейтронами керма, определяющая поглощенную дозу, складывается из кинетической энергии, оставленной в веществе атомами отдачи (части их энергии, идущей на ионизацию), а также продуктами ядерных реакций –

протонами и α -частицами. Вклад различных процессов определяется энергией нейтронного излучения. Нейтронные потоки на токамаке ИТЭР, рассчитанные для интересующих нас пространственных положений, на 60–80% состоят из промежуточных нейтронов с энергиями в диапазоне 10 кэВ – 1 МэВ, что значительно ниже порога (n, p)- и (n, α)-реакций (для изотопа ^{28}Si он составляет около 4 МэВ). При этом доля нейтронов с энергией выше пороговой не превышает 1–3%, и поглощенная доза практически полностью определяется торможением атомов отдачи. В то же время в спектре, полученном при облучении на циклотроне, около 30% нейтронов имели энергию выше 4 МэВ, а вклад в керму протонов и α -частиц, образованных ими, составлял примерно 1/2 (по оценке на основе данных работы [19]).

Необходимо, однако, учитывать, что накопительные радиационные эффекты, связанные с ионизацией вещества (т.е. с поглощенной дозой), как при облучении на циклотроне, так и при эксплуатации оборудования на токамаке ИТЭР создаются главным образом не нейтронным, а сопутствующим ему γ -излучением. Оно образуется при рассеянии нейтронов в материале конструкций, окружающих установку: при переходах в основное состояние ядер, возбужденных в реакции неупругого рассеяния, а также в (n, γ)-реакциях. В случае взаимодействия дейтронов с бериллиевой мишенью дополнительными источниками γ -квантов являются возбужденные ядра ^{10}B и ^{10}Be , рожденные в реакциях $^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}^*$ и $^9\text{Be}(d, p)^{10}\text{Be}^*$. При взаимодействии с веществом γ -кванты образуют интенсивный поток вторичных электронов, что и приводит к накоплению поглощенной дозы. Как показывает расчет, при размещении оборудования на токамаке ИТЭР доля, приходящаяся на сопутствующее γ -излучение, в полной поглощенной дозе составит примерно 65% и 80% в местах установки видеокамеры и светодиодной подсветки соответственно. В испытаниях на циклотроне соответствующая доля составляла около 90%, что было определено путем непосредственного измерения полной поглощенной дозы и сравнения полученного результата с расчетной кермой, приведенной в табл. 1.

Важным обстоятельством, относящимся к работе оборудования в условиях ИТЭР, является то, что флюенс нейтронов и полная поглощенная доза будут набираться в течение 10–15 лет при относительно невысоких потоках излучений. Такие условия было невозможно воспроизвести в испытаниях, ограниченных по времени. При облучении поток нейтронов превышал ожидаемые значения примерно на 2 порядка, чтобы необходимый флюенс был набран в течение одной-двух недель.

Облучение оборудования на циклотроне происходило в пассивном режиме, т.е. при отключенном питании. Это соответствовало будущим условиям эксплуатации, поскольку на токамаке ИТЭР система визуального контроля будет использоваться только в промежутках между плазменными разрядами, когда интенсивное фоновое излучение отсутствует.

5. РАДИАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВИДЕОКАМЕРЫ

Элементами камеры, чувствительными к радиационному воздействию, являются видикон, имеющий экран с фотопроводящим слоем, а также встроенная электроника. Для того чтобы получить требуемую величину флюенса нейтронов, было необходимо расположить камеру в непосредственной близости от мишени (на расстоянии около 10 см). При этом следовало учитывать угловую зависимость нейтронного выхода: на малых расстояниях от мишени при смещении от оси пучка интенсивность потока нейтронов быстро падает. Так, для толстой бериллиевой мишени угол расходимости пучка нейтронов на уровне половинной интенсивности составляет примерно 30° [15]. Таким образом, с учетом линейных размеров камеры (длина около 25 см, диаметр около 4 см) оказалось невозможным провести одновременное облучение экрана видикона и электронных компонентов, размещенных внутри корпуса камеры, до достижения необходимой величины флюенса. Поэтому было принято решение разделить испытания на два этапа: на первом облучить преимущественно встроенную электронику камеры, а на втором – видикон. В первом случае камера была расположена перпендикулярно оси пучка так, чтобы вблизи оси оказалась средняя часть камеры, в которой размещены платы с электронными компонентами. Во втором случае камера была установлена вдоль оси пучка, чтобы в максимальном нейтронном потоке находился фоточувствительный экран видикона (рис. 6). В обоих случаях поток нейтронов в месте установки камеры на оси пучка составлял примерно $2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Рис. 6.

На первом этапе испытаний при облучении встроенной электроники после достижения значения флюенса нейтронов $\Phi_{\text{экв}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ}) \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ вышел из строя модуль питания накала видикона. Поврежденная плата была демонтирована, а к накалу был подключен внешний блок питания, после чего облучение продолжилось. В течение 1 недели (40 рабочих часов) была достигнута величина флюенса $\Phi_{\text{экв}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ}) \approx 3.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, и камера осталась работоспособной. Полная поглощенная доза по

оценке составила 340 крад, что более чем в 20 раз превышает значение дозы, ожидаемой в условиях ИТЭР (15 крад). В то же время набранная доза примерно в 600 раз ниже допустимого значения 200 Мрад, определенного производителем, таким образом, она не являлась значимой для определения ресурса работы встроенной электроники при воздействии потока быстрых нейтронов.

По результатам первого этапа испытаний модель камеры D40M, предназначенной для использования на токамаке ИТЭР, была модифицирована производителем: модуль питания накала видикона исключен из состава камеры и выполнен в виде отдельной платы, устанавливаемой отдельно в блоке управления телевизионной системы.

На втором этапе испытания продолжились уже для модифицированной камеры: было проведено исследование стойкости к нейтронному облучению видикона. Для определения качества получаемого изображения была использована телевизионная испытательная таблица. Разрешение видеокамеры, оцененное визуально, до начала облучения составляло 550 телевизионных линий (ТВЛ). Облучение нейтронами продолжалось до той же величины флюенса, что и на первом этапе. В результате было отмечено ухудшение разрешения до 450 линий из-за появившихся на изображении шумов (рис. 7).

Рис. 7.

Ухудшение разрешения на 100 телевизионных линий (т.е. на 20% относительно исходного) не является критичным для работы камеры в составе системы визуального контроля: до облучения размеры одной ячейки на изображении обдирочной пленки составляют примерно 10 ТВЛ, а при ухудшении разрешения камеры на 20% они составят 8 ТВЛ, что достаточно для получения изображения приемлемого качества.

Таким образом, в результате испытаний было установлено, что модифицированная видеокамера D40M, входящая в состав системы визуального контроля, при $\Phi_{\text{ЭКВ}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ}) = 3.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ продолжает выполнять свою задачу получения изображения обдирочной пленки. Достигнутая величина флюенса примерно в 5 раз превышает ожидаемое расчетное значение для условий ИТЭР $\Phi_{\text{ЭКВ}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ}) = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Это означает, что полноценная работа видеокамеры на токамаке ИТЭР гарантируется в течение всего времени функционирования установки.

6. РАДИАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СВЕТОДИОДОВ

Светодиодная подсветка, входящая в состав системы визуального контроля, обеспечивает освещение обдирочной мишени, и важно, чтобы яркость светодиодов под воздействием потока быстрых нейтронов не падала ниже минимально допустимого уровня, необходимого для получения изображения пленки приемлемого качества. Критерием качественного изображения является возможность различения отдельных ячеек пленки и дефектов в них, если таковые имеются.

Для применения в модуле подсветки были выбраны сверхъяркие светодиоды в стандартном круглом корпусе диаметром 5 мм. Модуль подсветки представляет собой плату диаметром 56 мм с крепежными отверстиями, на которой размещен 21 светодиод (рис. 8). Светодиоды на плате соединены параллельно; последовательно с каждым из них установлен балластный резистор для компенсации различия вольт-амперных характеристик диодов и выравнивания протекающих через них токов.

Рис. 8.

В литературе имеется достаточно много информации о воздействии нейтронного излучения на параметры светодиодов. В общем случае с ростом флюенса нейтронов яркость светодиодов падает, так как дефекты, образующиеся в кристалле, становятся центрами безызлучательной рекомбинации [20, 21]. Зависимость интенсивности свечения от флюенса нейтронов определяется составом материала и структурой светодиода. Из имеющихся литературных данных можно сделать общий вывод о том, что синие, зеленые и белые светодиоды на основе нитрида галлия, разработанные в 90-х годах XX века и широко применяемые в настоящее время, обладают значительно более высокой радиационной стойкостью в сравнении со светодиодами, изготовленными на основе других материалов [22, 23].

Для испытаний были выбраны семь моделей сверхъярких светодиодов различных производителей, их наименования представлены в табл. 2. Информацию о материале светодиодов в доступной документации предоставляет только один производитель – Betlux: для белых светодиодов это InGaN. Можно утверждать, что белые и зеленые светодиоды марок Cree и Optosupply также выполнены на основе нитрида галлия. Для сравнения с этими светодиодами, которые, как ожидалось, должны обладать достаточно высокой радиационной стойкостью, были выбраны красные светодиоды производства компаний Cree и Optosupply; точная информация о материале, из которого они изготовлены, отсутствует.

Задача модуля подсветки – обеспечить достаточную освещенность пленки. Исходя из того, что под воздействием нейтронов излучающая способность светодиодов падает, перед началом испытаний для каждой модели светодиодов был определен допустимый диапазон относительного изменения силы света. За начальное (максимальное) значение принималась сила света при максимально допустимом длительном прямом токе; минимальное значение определялось возможностью получения качественного изображения пленки – критерием, указанным выше. Видеокамера дает телевизионный сигнал с частотой 25 кадров в секунду и не позволяет сделать одиночный снимок с увеличенной выдержкой, поэтому для получения изображения при минимальной освещенности мишени производилось программное наложение нескольких десятков кадров (рис. 9). Изменение интенсивности свечения светодиодов определялось с помощью фотодиода, чувствительного к излучению в видимой части спектрального диапазона. В зависимости от модели светодиодов оно составило 40–120 раз (см. табл. 2).

Рис. 9.

Таблица 2. Модели и параметры светодиодов, выбранных для испытаний

Модель светодиода	Производитель	Цвет свечения	Максимальный ток, мА	Сила света I_0 , мКд *	Диапазон $I_0/I_{\min}$, число раз **
BL-L522UWC	Betlux	Белый	30	15000	50
OSG3DA5111A	OptoSupply	Зеленый	30	30000	70
OSW5DK5111A	OptoSupply	Белый	30	40000	60
OS5RKA5111A	OptoSupply	Красный	50	50000-60000	70
C503B-RAN-CA0C0AA1	Cree	Красный	50	12000-32900	120
C503B-GAN-CB0F0792	Cree	Зеленый	30	16800-90500	65
C503D-WAN-CCBEB151	Cree	Белый	30	28200-64600	45

Примечание. *Номинальные значения. **Допустимое изменение силы света (от начального до минимального значения) при использовании светодиодов в системе визуального контроля. Диапазон измерен для образцов светодиодов, полученных для испытаний, и может отличаться для светодиодов тех же моделей из других партий (см. также разъяснение в тексте)

Следует отметить, что начальная сила света не является строго заданной величиной и может различаться в несколько раз даже для светодиодов одной модели, что наглядно видно по паспортным параметрам светодиодов марки Cree. Для

имевшихся экземпляров светодиодов это различие составило около 10–20%, однако значение силы света, по-видимому, может зависеть от конкретной партии светодиодов. Абсолютное значение силы света при измерениях не определялось, но при анализе результатов испытаний, представленных ниже, было учтено, что диапазоны изменения, приведенные в табл. 2, могут быть скорректированы для новых партий светодиодов тех же моделей.

Для проведения испытаний было составлено 5 сборок, в каждую сборку вошло по три светодиода одной модели. На свободном месте размещался активационный никелевый детектор для контроля флюенса нейтронов (рис. 10). Сборки были установлены на различных расстояниях от мишени (от 5 до 135 см), чтобы в результате облучения флюенс нейтронов на них составлял от 10^{12} до 10^{15} см^{-2} (рис. 11). Максимальный поток нейтронов на первой сборке, ближайшей к мишени, составлял примерно $7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Рис. 10.

Рис. 11.

Облучение проводилось в течение четырех рабочих дней. Его визуально наблюдаемым результатом для светодиодов, находившихся в интенсивном нейтронном потоке, стало окрашивание пластикового корпуса (линзы) до начала облучения бесцветного (рис. 12). Это могло повлиять на прозрачность линзы для излучаемого света, но разделить эффекты падения силы света в результате деградации самого светодиода и вследствие изменения прозрачности его корпуса было невозможно. С практической же точки зрения применения светодиодов как готовых изделий в этом не было необходимости.

Рис. 12.

Контрольные измерения проводились на третий и четвертый дни после окончания облучения. Их результаты представлены в табл. 3. Приведенные данные получены при максимальном значении прямого тока для каждой модели светодиодов. Для светодиодов в первой сборке указан диапазон значений флюенса нейтронов и изменения силы света: разброс объясняется близким расположением данной сборки к мишени и связанной с этим неоднородностью потока нейтронов.

Таблица 3. Падение интенсивности свечения светодиодов (число раз) при максимальном прямом токе в зависимости от величины флюенса нейтронов

Марка светодиодов	Флюенс нейтронов $\Phi_{\text{экв}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ}), \text{ см}^{-2}$				
	$(0.7-1.3) \cdot 10^{15}$	$2.1 \cdot 10^{14}$	$4.4 \cdot 10^{13}$	$6.4 \cdot 10^{12}$	$8.5 \cdot 10^{11}$
BL-L522UWC	5–9	2.0	1.2	1.1	1.0
C503B-GAN-CB0F0792	2.5 – 4	1.5	1.1	1.0	1.0
C503D-WAN-CCBEB151	3–5	1.5	1.1	1.0	1.0
C503B-RAN-CA0C0AA1	200–600	20	3.0	1.2	1.1
OSG3DA5111A	4–6	1.5	1.2	1.0	1.0
OSW5DK5111A	9–13	2.0	1.2	1.1	1.0
OS5RKA5111A	250–500	30	2.5	1.2	1.1

После облучения при первой подаче максимального прямого тока на светодиоды из первой и второй сборки, для которых величина флюенса нейтронов составила более 10^{14} см^{-2} , наблюдался рост яркости свечения на 10–60% в течение нескольких минут, что, по-видимому, связано с постепенным отжигом дефектов [23]. При включении светодиодов на следующий день такой эффект не наблюдался, однако за сутки восстановление яркости составило дополнительно около 5–10%.

Как и ожидалось, наиболее сильно падение яркости выражено для красных светодиодов C503B-RAN-CA0C0AA1 и OS5RKA5111A: при максимальном полученном значении флюенса оно составляет не менее 200 раз, что недопустимо велико для применения данных светодиодов в составе системы визуального контроля. Однако для белых и зеленых светодиодов падение яркости выражено в гораздо меньшей степени (оно не превышает одного порядка). Следует отметить, что величина падения яркости при одинаковом значении флюенса нейтронов зависит от прямого тока, протекающего через светодиод, – она тем меньше, чем выше ток. Для иллюстрации этого эффекта на рис. 13 приведены соответствующие зависимости для двух выбранных светодиодов из первой сборки, находившихся наиболее близко к оси пучка, где значение нейтронного флюенса было максимально: $\Phi_{\text{ЭКВ}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ}) \approx 1.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Рис. 13.

С учетом потока γ -излучения, сопутствующего нейтронам, максимальная величина поглощенной дозы для светодиодов в первой сборке составила примерно 0.7–1.4 Мрад, что примерно на два порядка ниже характерных значений дозы, приводящей к заметному изменению силы света [20, 23]. Таким образом, наблюдаемый в испытаниях эффект полностью связан с действием на светодиоды нейтронного излучения. Этот вывод относится и к условиям реактора ИТЭР, где по оценке поглощенная доза составит примерно 0.1 Мрад.

В системе визуального контроля подсветка будет включаться кратковременно и работа светодиодов на максимальном токе не скажется на ресурсе и надежности работы системы в целом. В этом случае все испытанные белые и зеленые светодиоды могут быть рекомендованы для использования в составе системы. Было принято решение сделать выбор в пользу марки Cree, поскольку для данных светодиодов производителем предоставляется наиболее полная информация об основных

параметрах, в частности о начальной силе света, которая, как было отмечено выше, для светодиодов одной модели может различаться в несколько раз. Результаты испытаний позволяют утверждать, что даже с учетом этого фактора при использовании светодиодов C503B-GAN-CB0F0792 либо C503D-WAN-CCBEB151 запас по освещенности пленки составит не менее трех раз при флюенсе нейтронов $\Phi_{\text{ЭКВ}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ}) \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Это значение превышает ожидаемое значение флюенса нейтронов в условиях ИТЭР $\Phi_{\text{ЭКВ}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ}) = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ был создан и испытан макет системы оперативного визуального контроля состояния обдирочных мишеней для атомных анализаторов на токамаке ИТЭР. Было продемонстрировано, что система позволяет обнаруживать механические повреждения обдирочной пленки в ячейках сетки размером $0.35 \times 0.35 \text{ мм}^2$ и оперативно оценивать их общее количество для принятия решения о необходимости замены мишени. Контроль состояния мишени занимает несколько минут и может проводиться непосредственно перед плазменным разрядом. Данный метод эффективно дополняет систему, основанную на применении ионного источника.

По результатам испытаний на пучке быстрых нейтронов видеокамера D40M, входящая в состав системы визуального контроля, была модифицирована, что позволило увеличить ресурс ее работы до значения нейтронного флюенса не ниже $\Phi_{\text{ЭКВ}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ}) \approx 3.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, превышающего ожидаемое значение в условиях реактора ИТЭР $\Phi_{\text{ЭКВ}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ})^{\text{ITER}} = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. При этом ухудшение разрешения видеокамеры составляет около 20%, что не сказывается на возможности обнаружения повреждений в обдирочной пленке. Также установлено, что стандартные коммерчески доступные светодиоды на основе нитрида галлия производства компании Cree, выбранные для использования в модуле подсветки, после достижения значения нейтронного флюенса $\Phi_{\text{ЭКВ}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ}) \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$ обладают запасом по силе света не менее трех раз (ожидаемая величина флюенса на токамаке ИТЭР в данном случае составляет $\Phi_{\text{ЭКВ}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ})^{\text{ITER}} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$). Таким образом, наиболее чувствительные к фоновому нейтронному излучению элементы обладают достаточным запасом надежности и обеспечат стабильную работу системы визуального контроля качества обдирочных мишеней в течение всего времени работы реактора ИТЭР.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного контракта от 20.03.2024 № Н.4а.241.19.24.1024 на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ между Частным учреждением “ИТЭР-Центр” и Государственной корпорацией по атомной энергии “Росатом”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Medley S.S., Donné A.J.H., Kaita R., Kislyakov A.I., Petrov M.P., Roquemoire A.L.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2008. V. 79. P. 011101. <https://doi.org/10.1063/1.2823259>
2. *Maier-Komor P.* // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* 1993. V. 79. P. 841. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(93\)95482-K](https://doi.org/10.1016/0168-583X(93)95482-K)
3. *Aymar R., Barabaschi P., Shimomura Y.* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2002. V. 44. P. 519. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/44/5/304>
4. *Afanasyev V.I., Chernyshev F.V., Kislyakov A.I., Kozlovski S.S., Lyublin B.V., Mironov M.I., Melnik A.D., Nesenevich V.G., Petrov M.P., Petrov S.Ya.* // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 2010. V. 621. P. 456. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.201>
5. *Behrisch R., Federici G., Kukushkin A., Reiter J.* // *Nucl. Mater.* 2003. V. 388. P. 313
6. *Афанасьев В.И., Гриневич К.А., Наволоцкий А.С.* РФ Патент 196708 U1. Бюл. № 8-2020.
7. *Афанасьев В.И., Козловский С.С., Лихтенштейн В.Х., Люблин Б.В., Мельник А.Д., Миронов М.И., Несеневич В.Г., Петров М. П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В.* // ПТЭ. 2010. № 2. С. 114.
8. *Melnik A.D., Afanasyev V.I., Davydenko V.I., Chernyshev F.V., Kolmogorov A.V., Mironov M.I., Mokeev A.N., Navolotsky A.S., Nesenevich V.G., Petrov M.P., Petrov S.Ya.* // *Rev. Sci. Instr.* 2020. V. 91. P. 123301. <https://doi.org/10.1063/5.0022149>
9. Радиационно стойкое телевизионное оборудование. Каталог АО “Диаконт” [Электронный ресурс] // URL: https://www.diakont.ru/wp-content/uploads/2023/06/catalog_diakont_tv.pdf (дата обращения 06.17.2025)
10. *Loughlin M., Angelone M., Batistoni P., Bertalot L., Eskhult J., Konno C., Pampin R., Polevoi A., Polunovskiy E.* // *Fusion Eng. Des.* 2014. V. 89. P. 1865. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.03.070>

11. *J.E. Sweezy, T.E. Booth, F.B. Brown, J.S. Bull, R.A. Forster III, J.T. Goorley, H.G. Hughes III, R.L. Martz, R.E. Prael, A. Sood, A.J. Zukaitis, R.C. Little, H.R. Trellue, M.C. White, M.B. Lee, S.M. Girard.* Los Alamos National Laboratory Tech. Rep. LA-UR-03-1987. Los Alamos, NM, USA, 2003.
12. *Brede H. J., Dietze G., Kudo K., Shrewe U.J., Tancu F., Wen C.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1989. V. 274. P. 332. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)90399-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(89)90399-9)
13. *Lone M.A., Ferguson A.J., Robertson B.C.* // Nucl. Instr. Meth. 1981. V. 189. P. 515. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(81\)90438-9](https://doi.org/10.1016/0029-554X(81)90438-9)
14. *Meadows J.W., Smith D.L.* // Proc. SPIE, Neutrons, X Rays, and Gamma Rays: Imaging Detectors, Material Characterization Techniques, and Applications. 1992. V. 1737. P. 344. <https://doi.org/10.1117/12.138675>
15. *Weaver K.A., Anderson J.D., Barschall H.H., Davis J.C.* // Nuclear Science and Engineering. 1973. V. 52. P. 35. <https://doi.org/10.13182/NSE73-A23287>
16. ASTM E722-93: Standard Practice for Characterizing Neutron Fluence Spectra in Terms of Equivalent Monoenergetic Neutron Fluence for Radiation Hardness Testing of Electronics. Annual Book of ASTM Standards. Am. Soc. Testing Mater. 1993.
17. *Griffin P.J.* Report SAND2016-2269. Sandia National Laboratories. 2016.
18. *Caswell R.S., Coyne J.J., Randolph M.L.* // Int. J. Appl. Radiat. Isot. 1982. V. 33. P. 1227. [https://doi.org/10.1016/0020-708X\(82\)90246-0](https://doi.org/10.1016/0020-708X(82)90246-0)
19. *Smith E.C., Binder D., Compton P.A., Wilbur R.I.* // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1966. V. 13. № 6. P. 11. <https://doi.org/10.1109/TNS.1996.4324340>
20. *Lischka H., Henschel H., Lennartz W., Schmidt K.U.* // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1992. V. 13. P. 423. <https://doi.org/10.1109/23.277530>
21. *Iida T., Kosuga M., Sumita K., Heikkinen D.W.* // J. Nuclear Science and Technology. 1990. V. 27. P. 651. <https://doi.org/10.1080/18811248.1990.9731234>
22. *Гридин В.Н., Рыжиков И.В., Виноградов В.С.* // Известия вузов. Электроника. 2009. Т. 75. № 1. С. 27.
23. *Pearton S.J., Ren F., Patrick E., Law M.E., Polyakov A.Y.* // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2016. V. 5. P. Q35. <https://doi.org/10.1149/2.0251602jss>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Обдирочная мишень – тонкая углеродная пленка на поддерживающей сетке, зафиксированной на металлической оправке.

Рис. 2. Схема системы визуального контроля качества обдирочных мишеней: 1 – подсветка, 2 – рассеивающий экран, 3 – обдирочная мишень, 4 – зеркало, 5 – диафрагма, 6 – линза, 7 – видеокамера, 8 – ось вакуумного канала. Стрелками показаны направления распространения света и перемещения подвижных элементов системы – рассеивающего экрана и зеркала.

Рис. 3. Трехмерная модель системы: 1 – модуль подсветки, 2 – рассеивающий экран, 3 – видеокамера, 4 – ось вакуумного канала.

Рис. 4. Снимок пленки. Пустые ячейки – повреждения, сделанные намеренно для определения возможности их идентификации с помощью системы визуального контроля.

Рис. 5. Расчетные энергетические спектры нейтронов в месте установки видеокамеры (1) и модуля подсветки (2) на установке ИТЭР.

Рис. 6. Размещение видеокамеры в ходе радиационных испытаний: а – первый этап испытаний, камера расположена вдоль оси пучка нейтронов (1 – видеокамера, 2 – бериллиевая мишень, 3 – ось нейтронного пучка); б – второй этап испытаний, камера расположена перпендикулярно оси пучка.

Рис. 7. Изображение испытательной таблицы, снятое видеокамерой: а – до облучения; б – после облучения.

Рис. 8. Трехмерная модель печатной платы модуля подсветки с установленными светодиодами.

Рис. 9. Изображения обдирочной мишени, полученные с помощью системы визуального контроля: а – при максимальном прямом токе через светодиоды (один кадр); б – при минимальном токе (один кадр); в – при минимальном токе (наложение 50 кадров).

Рис. 10. Схема расположения светодиодов в сборке для облучения. Светодиоды каждой модели скомбинированы в группы по три и пронумерованы; СВ – место размещения активационного детектора-свидетеля для контроля величины флюенса нейтронов.

Рис. 11. Размещение светодиодныхборок при облучении; сборки пронумерованы от 1 до 5, с увеличением номера сборки расстояние от мишени возрастает.

Рис. 12. Окрашивание корпусов светодиодов после облучения. Нумерация сборок соответствует рис. 11: **а** – сборка № 3, **б** – сборка № 2, **в** – сборка № 1.

Рис. 13. Уменьшение величины силы света I_v по отношению к начальному значению I_{v0} для двух светодиодов: зеленого C503B-GAN-CB0F0792 (кривая 1) и красного C503B-RAN-CA0C0AA1 (кривая 2) при $\Phi_{\text{экв}}(\text{Si } 1 \text{ МэВ}) \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$, в зависимости от прямого тока.

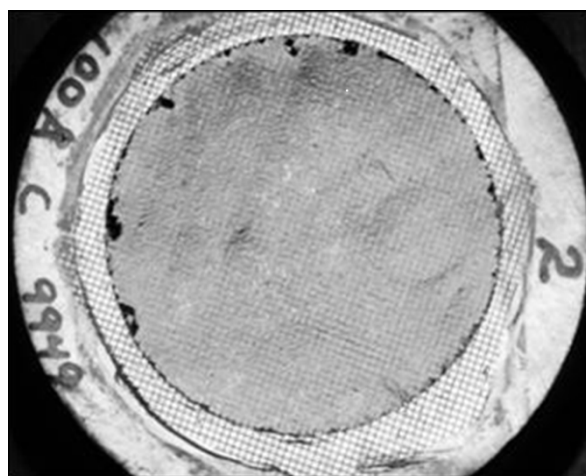


Рис. 1

цифры – курсив

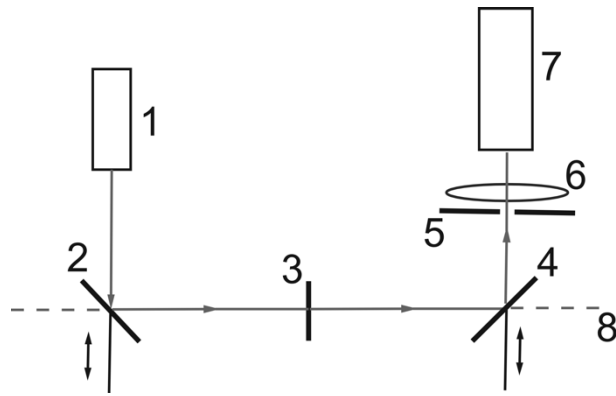


Рис. 2

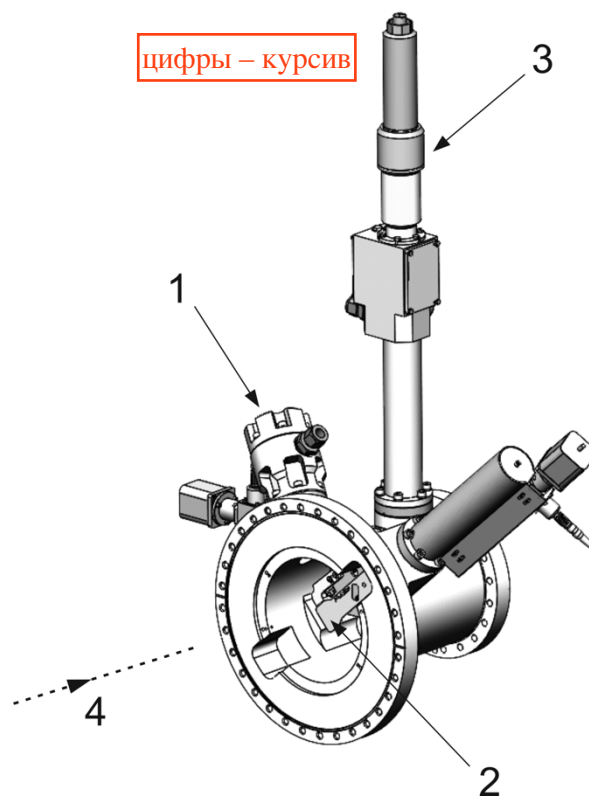


Рис. 3

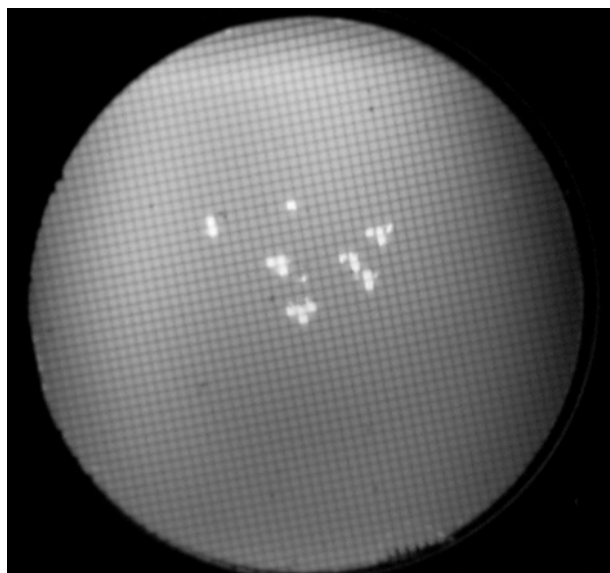


Рис. 4

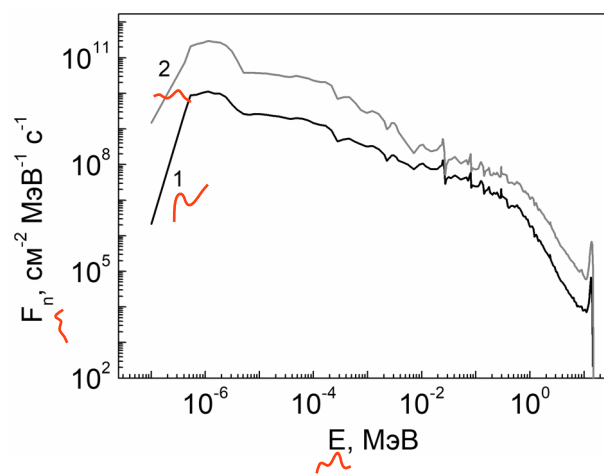
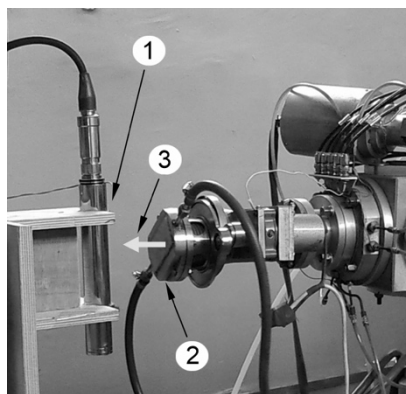


Рис. 5

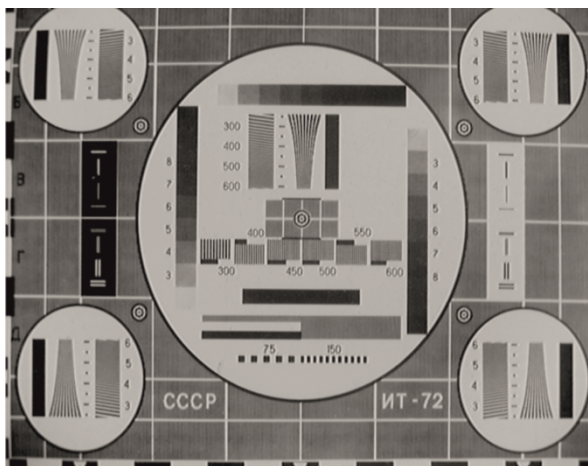


(а)

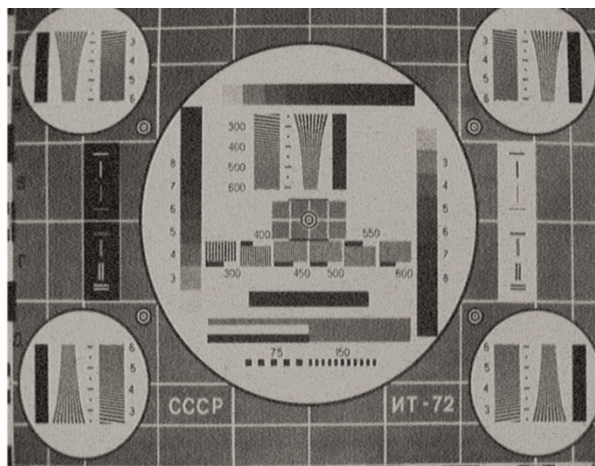


(б)

цифры – курсив Рис. 6



(а)

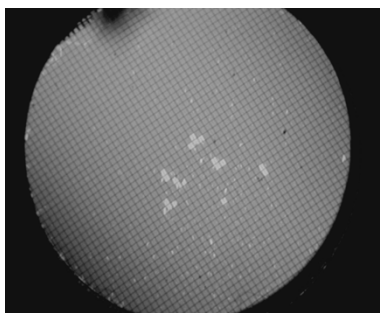


(б)

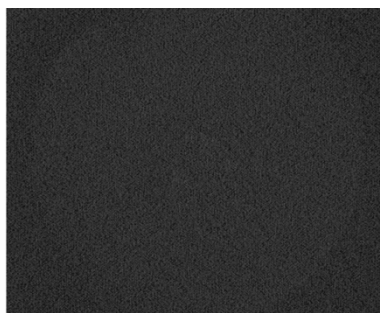
Рис. 7



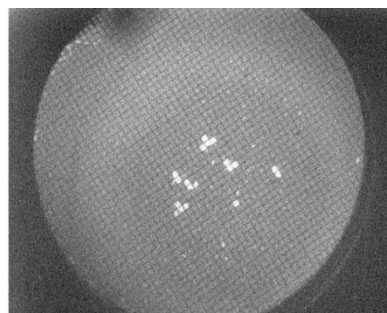
Рис. 8



(a)



(б)



(в)

Рис. 9

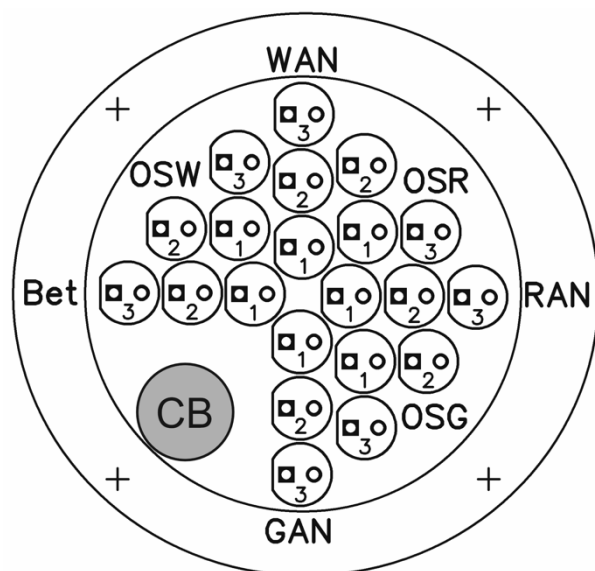


Рис. 10

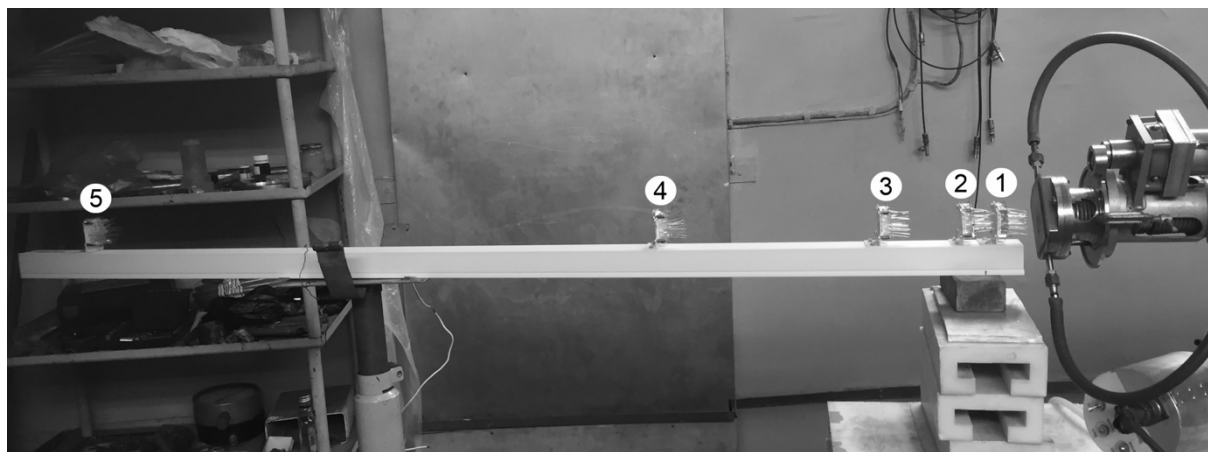
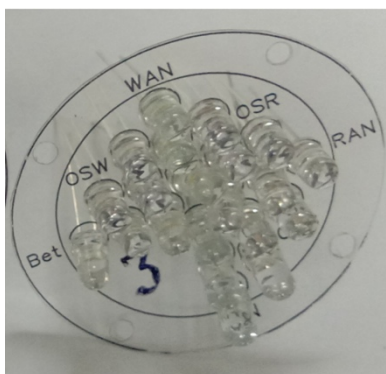
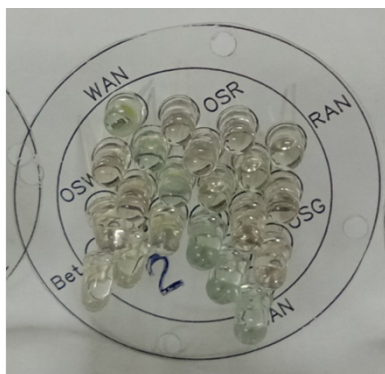


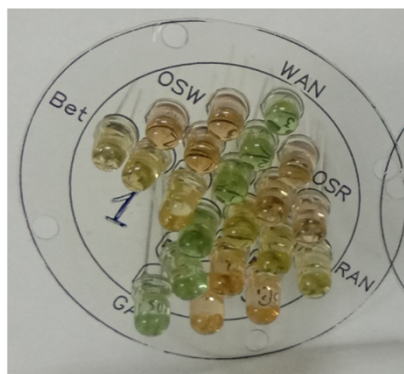
Рис. 11



(a)



(б)



(в)

Рис. 12

I – курсив

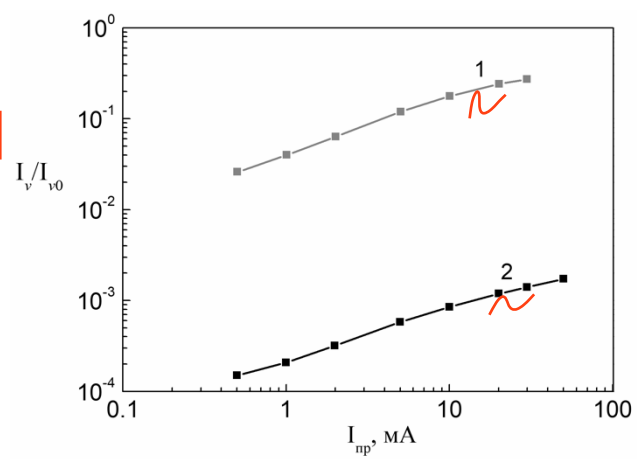


Рис. 13