

КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРНЫХ ПЛЕНОК IMAGING PLATES ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

© 2023 г. А. О. Хурчиев^{а,*}, В. А. Панюшкин^а, А. В. Скобляков^а, А. В. Канцырев^{а,**},
А. А. Голубев^а, Р. О. Гаврилин^а, А. В. Богданов^а, Е. М. Ладыгина^а, С. А. Высоцкий^а

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

*e-mail: ayuxa@inbox.ru

**e-mail: kantsyrev@itep.ru

Поступила в редакцию 12.01.2023 г.

После доработки 12.01.2023 г.

Принята к публикации 03.03.2023 г.

Информация об эмитируемых заряженных частицах плазмой сильноточных разрядов представляет интерес как с точки зрения понимания фундаментальных процессов, происходящих в импульсной плазме, так и для прикладных задач. Компактные магнитные спектрометры на основе постоянных магнитов позволяют проводить измерения потока заряженных частиц от плазмы в условиях сильных электромагнитных наводок. Пленочные детекторы Imaging Plate (IP) являются одними из наиболее часто используемых типов детекторов для регистрации заряженных частиц в лазерно-плазменных и электроразрядных экспериментах. В данной работе представлены результаты калибровки пленки IP BAS-MS при регистрации электронов и пленки IP BAS-TR при регистрации ионов гелия и вольфрама. Получены калибровочные зависимости чувствительности пленки BAS-MS для электронов в диапазоне энергий 0.65–50 МэВ и чувствительности пленки BAS-TR для ионов вольфрама в диапазоне энергий от 20 эВ до 650 кэВ с учетом углов падения частиц на детектор.

DOI: 10.31857/S0032816223050294, EDN: LGGDJN

ВВЕДЕНИЕ

Информация о корпускулярных потоках, эмитируемых сильноточными разрядами, представляет интерес как с точки зрения исследования процессов, происходящих в плазме Z-пинча, так и для прикладных задач. По энергетическому спектру заряженных частиц можно судить о механизмах ускорения плазмы (ионов и электронов), а по зарядовому составу ионов — о температуре плазмы. Компактные магнитные спектрометры на основе постоянных магнитов позволяют проводить измерения энергетического спектра заряженных частиц от плазмы Z-пинча, обеспечивая стабильную работу в условиях сильных электромагнитных наводок, возникающих в сильноточных мегаамперных электрофизических установках. Для регистрации и количественного измерения спектра заряженных частиц плазмы важны выбор типа детектора и его калибровка. На сегодняшний день существует много типов детекторов для регистрации высокоэнергетичных электронов и ионов, таких как сцинтилляторы, радиоохромные пленки (RCF), пленочные детекторы Imaging Plates (IP) и др. Несмотря на то что пленочные детекторы позволяют получить только интегральную по

времени информацию о детектируемых частицах, они обладают рядом преимуществ: невосприимчивостью к электромагнитным импульсам, высоким динамическим диапазоном (10^5 – 10^6), высоким пространственным разрешением (вплоть до десятков микрон). Важным преимуществом применения пленочных детекторов Imaging Plates является то, что их можно использовать многократно, применяя для промежуточной очистки источник белого света. Наибольшее распространение получили детекторные пленки Imaging Plates на основе фотостимулируемого люминофора (BaFBr:Eu²⁺) [1, 2] производства FujiFilm Biological Analysis System (BAS): BAS-MS, BAS-TR, BAS-SR. Для считывания данных с пленок Imaging Plates используются сканеры на основе источников лазерного излучения.

В течение последнего десятилетия было опубликовано достаточно много работ по калибровке IP. Одна из первых работ по измерению чувствительности детекторных пленок BAS-SR была проведена в 2005 году [3] для электронов с энергиями 11.5, 30 и 100 МэВ. В 2015 году были измерены чувствительности пленок BAS-MS, BAS-TR, BAS-SR, BAS-MP, BAS-ND для электронов с

энергиями 5–18 МэВ [4]. В 2017 году вышла публикация [5], посвященная калибровке пленок BAS-SR и BAS-MS для электронов в диапазоне энергий от 150 кэВ до 1.75 МэВ. С помощью радиоактивных источников излучения в работе [6] была проведена калибровка IP BAS-MS, BAS-TR и BAS-SR для электронов, фотонов и α -частиц. Часть работ была посвящена калибровке чувствительности детекторных пленок для ионов различных типов: так в работе [7] была измерена чувствительность детекторных пленок BAS-MS, BAS-SR, BAS-TR для моноэнергетичных протонов в диапазоне энергий от 600 кэВ до 3.2 МэВ, в работе [8] — пленки BAS-TR для протонов, дейтронов и α -частиц в диапазоне энергий от 0.6 до 5.4 МэВ. Для ионов углерода с зарядами от +3 до +6 и диапазона энергий от 3 до 300 МэВ в работе [9] была проведена калибровка IP BAS-TR. Было показано, что чувствительность пленки не зависит от заряда иона. Работа [10] расширила энергетический диапазон для протонов (<0.2 МэВ) и ионов углерода (<1 МэВ). Калибровка более тяжелых ионов ($6 < Z < 54$) была проведена в работах [11–13]. Однако экспериментальные результаты, полученные различными исследовательскими группами, не всегда коррелировали между собой, и в работе [14] было показано, что чувствительность пленки зависит также от типа сканера, поэтому необходима калибровка чувствительности пленки для конкретного лазерного сканера. Во всех вышеприведенных работах были использованы промышленные сканеры фирмы FujiFilm серий FLA и BAS с большим полем сканирования вплоть до формата A3. Недостатками таких сканеров являются высокая стоимость, большие габариты и масса. При измерении спектров заряженных частиц от импульсной плазмы с помощью компактных магнитных спектрометров не требуется большого поля сканирования IP, в таком случае могут использоваться медицинские лазерные сканеры, имеющие меньшую стоимость и малые габариты [15].

В данной работе представлены результаты абсолютной калибровки детекторных пленок BAS-MS и BAS-TR, используемых в составе компактного магнитного спектрометра при регистрации потока электронов и ионов от плазмы Z-пинча. Измерения проводились при использовании медицинского сканера Durr Dental Mini View.

МАГНИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

В экспериментах на установке “Ангара 5-1” для измерения потока заряженных частиц от плазмы мегаамперного Z-пинча разработан компактный магнитный спектрометр на постоянных магнитах, рассчитанный на измерение электронов в диапазоне энергий от 0.65 до 50 МэВ и

ионов с отношением импульса к заряду p/Z от 6 до 52 МэВ/с. Схема магнитного спектрометра показана на рис. 1. Регистрация заряженных частиц осуществлялась с помощью пленок BAS-MS для электронов и BAS-TR для ионов, размещаемых на торцевых поверхностях внутри прибора. Размер детекторных пленок 20×100 мм. В данной работе приведены характеристики спектрометра для входной щели с зазором 100 мкм, щель изготовлена из вольфрама толщиной 3 мм.

Расчет дисперсионных кривых магнитного спектрометра выполнен методом конечных элементов с учетом измеренного распределения магнитного поля при моделировании прохождения ионов и электронов в спектрометре. Измерение напряженности магнитного поля в рабочей области спектрометра выполнялось с помощью датчика Холла ПХЭ 602817Б со стабилизацией тока и высокоточного прибора для измерения напряжения Keysight DAQ970A (динамический диапазон 22 бит, разрешающая способность 100 нВ) с коммутирующей платой DAQM901. Среднее значение дипольной компоненты магнитного поля составляет 0.55 ± 0.05 Тл (рис. 2).

Результирующая дисперсионная кривая для электронов и ионов показана на рис. 3. Энергетическое разрешение спектрометра не хуже 0.8%.

ПЛЕНОЧНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ IMAGING PLATES BAS-TR И BAS-MS

Пленочные детекторы Imaging Plates состоят из чувствительного слоя $\text{BaFBr}_{0.85}\text{I}_{0.15}$ с легированными ионами Eu^{2+} , магнитного слоя для фиксации пленки, опорного слоя и защитного слоя для версии пленки BAS-MS (табл. 1).

Чувствительный слой пленки BAS-MS покрыт защитным полимером ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}$) толщиной 9 мкм. Пленка BAS-TR не имеет защитного слоя, что позволяет регистрировать ионы низких энергий. Для считывания данных с пленок Imaging Plates в данной работе использовался лазерный сканер VistaScan Mini View компании Durr Dental [16] (динамический диапазон ФЭУ 16 бит, пространственное разрешение 40 пар линий/мм (размер пикселя 12.5 мкм), мощность лазера 10 мВт, имеется встроенное устройство для очистки данных с пленок). При попадании заряженных частиц или излучения в чувствительный слой за счет ионизации образуются метастабильные состояния Eu^{3+} . При сканировании пленки происходит облучение люминофорного слоя фотонами с энергией 2 эВ (длина волны излучения ~635 нм), что приводит к перевозбуждению и рекомбинации ионов Eu^{3+} с эмиссией фотонов с энергией 3 эВ (длина волны излучения ~390 нм), известной в литературе как фотостимулированное излучение (Photo-stimulated luminescence, PSL) [1]. PSL пропорцио-

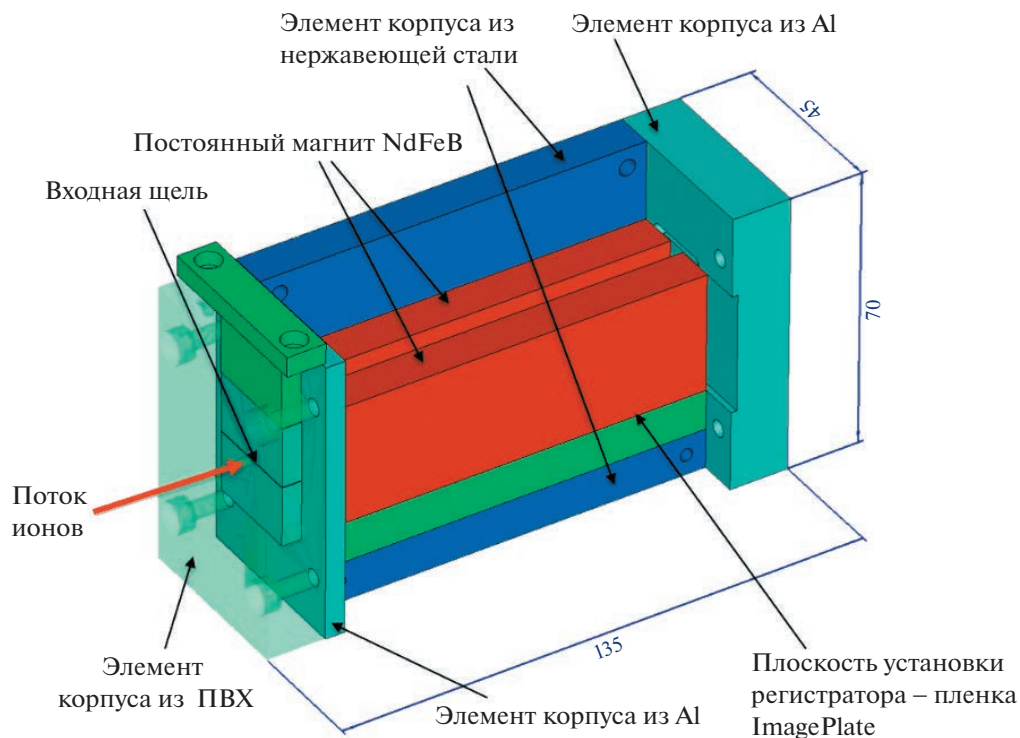


Рис. 1. Схема магнитного спектрометра на постоянных магнитах.

нально поглощенной энергии частицы в люминофорном слое детектора. В сканере VistaScan Mini View излучение регистрируется с помощью ФЭУ, данные записываются в единицах GL (gray-level), линейно зависящих от PSL [15].

КАЛИБРОВКА ПЛЕНОЧНЫХ ДЕТЕКТОРОВ IMAGING PLATES С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОАКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Известно [4–13], что чувствительность пленок Imaging Plates BAS-MS и BAS-TR при регистрации заряженных частиц нелинейно зависит от энергии регистрируемой частицы, причем абсолютная калибровочная кривая зависит от типа используемого сканера. Кроме того, получаемые при сканировании пленок данные зависят от времени, прошедшего от облучения пленки до момента сканирования [4]. В случае регистрации интенсивных потоков заряженных частиц, когда уровень зарегистрированного сигнала находится в насыщении, имеется возможность многократно снимать данные при повторных сканированиях пленок [17]. В данной работе для калибровки детекторных пленок использовались радиоактивные источники: источник β -частиц (изотоп $^{90}\text{Sr}^{90}\text{Y}$) с максимумом энергии 2.28 МэВ и источник α -частиц (изотоп ^{239}Pu) с энергией 5.1 МэВ, а также источник γ -излучения с энергией фотонов 511 и 1274 кэВ. В процессе калибровки устанавли-

вались следующие внутренние настройки сканера: пространственное разрешение – 40 пар линий/мм, напряжение ФЭУ – 610 В.

Временная калибровка пленочных детекторов

Калибровка пленок с определением изменения данных, считываемых с пленок, в зависимости от времени, прошедшего между облучением и сканированием, для пленки BAS-MS выполнена

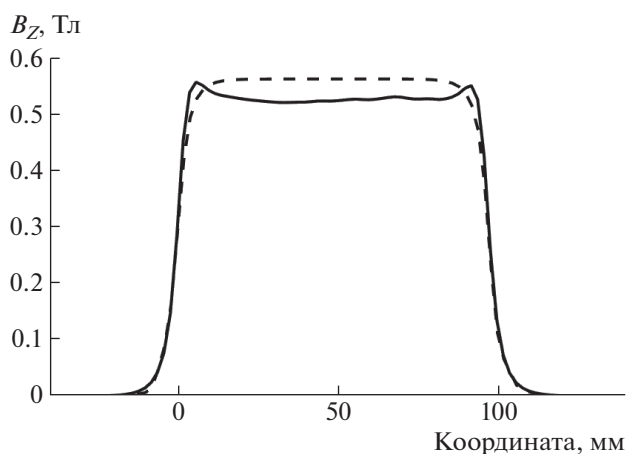


Рис. 2. Результаты измерения магнитного поля на оси спектрометра (сплошная кривая) в сравнении с расчетным распределением (штриховая кривая).

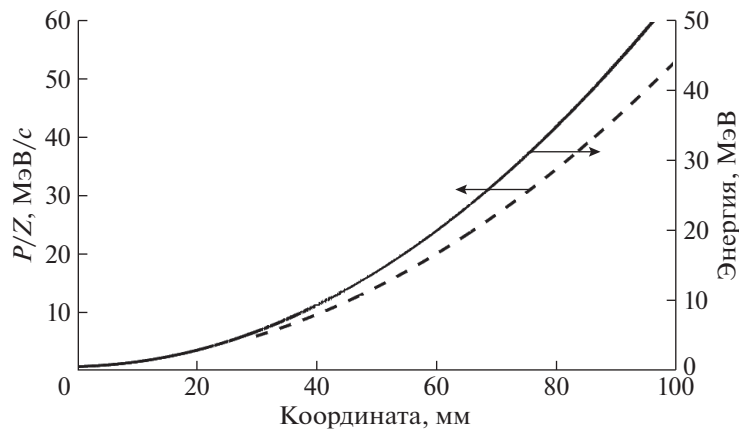


Рис. 3. Дисперсионные кривые магнитного спектрометра для ионов (штриховая кривая) и электронов (сплошная кривая) в зависимости от координаты на плоскости регистрации спектрометра.

с использованием радиоактивного источника излучения β -частиц (2СО, изотоп $^{90}\text{Sr}^{90}\text{Y}$, максимум энергии 2.28 МэВ) и источника γ -излучения (изотоп ^{22}Na , энергия γ -квантов 511 и 1274 кэВ). Аналогичная зависимость для пленки BAS-TR получена с использованием вышеупомянутых источников, а также радиоактивного источника α -частиц (тип 1П9, изотоп ^{239}Pu , энергия 5.1 МэВ). Облучение проводилось при времени экспозиции 5 мин. При облучении между радиоактивным источником и пленкой IP устанавливался свинцовый коллиматор толщиной 4 мм с отверстием диаметром 10 мм. Задержка между облучением и сканированием пленок варьировалась в диапазоне от нескольких

минут до нескольких часов. Результаты калибровки приведены на рис. 4 и 5.

С использованием экспериментальных данных калибровки построена аппроксимирующая функция [4] вида:

$$f(t) = A_1 \exp(-t/B_1) + A_2 \exp(-t/B_2), \quad (1)$$

где t , мин — время, прошедшее от облучения пленки до считывания в сканере; коэффициенты A_1 , A_2 , B_1 , B_2 указаны в табл. 2 с погрешностями (стандартное отклонение).

Погрешность измерений при проведении эксперимента не превышала 10%.

Таблица 1. Состав слоев детекторных пленок BAS-MS и BAS-TR

Слой	Тип пленки	
	BAS-MS	BAS-TR
Защитный		
Состав	$\text{C}_2\text{H}_2\text{O}$	Без слоя
Плотность, г/см ³ (толщина, мкм)	1.66 (9)	—
Чувствительный		
Состав	$\text{BaFBr}_{0.85}\text{I}_{0.15} \cdot \text{Eu}^{2+}$	$\text{BaFBr}_{0.85}\text{I}_{0.15} \cdot \text{Eu}^{2+}$
Плотность, г/см ³ (толщина, мкм)	3.31 (115)	2.85 (50)
Опорный		
Состав	$\text{C}_2\text{H}_2\text{O}$	
Плотность, г/см ³ (толщина, мкм)	1.66 (190)	1.66 (250)
Магнитный		
Состав	$\text{ZnMn}_2\text{Fe}_5\text{NO}_{40}\text{H}_{15}\text{C}_{10}$	
Плотность, г/см ³ (толщина, мкм)	2.77 (160)	

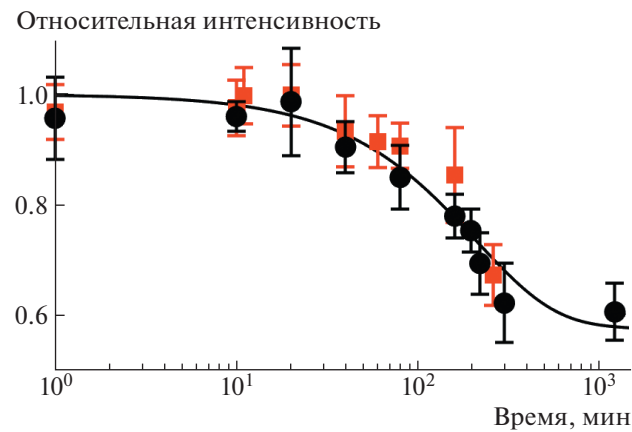


Рис. 4. Изменение сигнала с пленки BAS-MS в зависимости от времени, прошедшего с момента облучения до момента сканирования, при облучении β-частицами (кружки) и γ-квантами (квадраты). Сплошная кривая — аппроксимирующая зависимость.

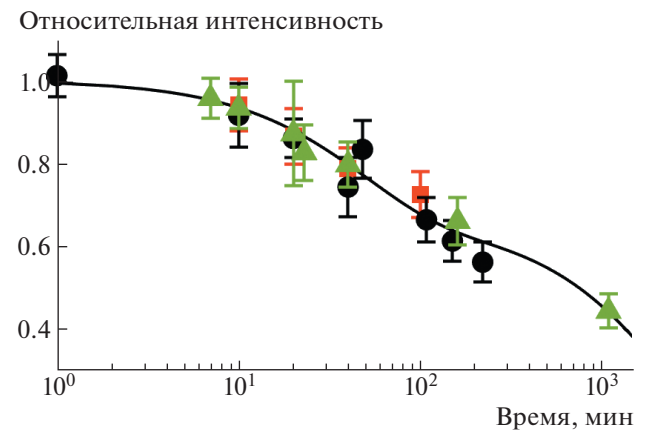


Рис. 5. Изменение сигнала с пленки BAS-TR в зависимости от времени, прошедшего с момента облучения до момента сканирования, при облучении α-частицами (треугольники), β-частицами (кружки) и γ-квантами (квадраты). Сплошная кривая — аппроксимирующая зависимость.

Из полученных данных следует, что калибровочные кривые (см. рис. 4, 5) не зависят от типа источников (γ, α или β), используемых при облучении пленок BAS-MS и BAS-TR.

Абсолютная калибровка детекторных пленок для электронов и ионов

Регистрируемый детекторными пленками сигнал GL зависит от поглощенной энергии заряженной частицы в чувствительном слое. В работе [6] была предложена экспоненциальная модель зависимости чувствительности пленок BAS-MS, BAS-TR и BAS-SR от поглощенной энергии dE_{dep} в расчете на одну частицу:

$$PSL(E) = \alpha \int_0^W \frac{dE_{\text{dep}}}{dz}(E, z) e^{-z/L} dz = \alpha dE_{\text{dep}}^{\text{eff}}, \quad (2)$$

где $\frac{dE_{\text{dep}}}{dz}$ — количество энергии, выделяемой падающими и всеми вторичными частицами в люминофорном слое между z и $z + dz$; W — толщина слоя люминофора; L — длина поглощения фотонов фотостимулированного излучения, образованных в процессе сканирования пленки.

Экспоненциальный множитель в формуле (2) учитывает ослабление потока фотонов на глубине z в люминофорном слое. Коэффициент α зависит от типа заряженной частицы, но не зависит от ее энергии. Таким образом, измерив отклик пленки для узкого диапазона энергий и зная потери энергии заряженной частицы, можно определить калибровочную кривую для широкого диапазона энергий.

В работе [18] была выведена эмпирическая формула для описания чувствительности пленки BAS-TR для ионов различных типов:

$$PSL(E) = A \int_0^W \frac{dE_{\text{dep}}/dz}{1 + B|dE_{\text{dep}}/dz|} e^{-z/L} dz, \quad (3)$$

где $A = 2.4 \cdot 10^{-4} \text{ PSL/кэВ}$; $B = 15 \text{ мкм/МэВ}$.

Расчеты, проведенные с помощью данной формулы, показали хорошее согласие с существующими экспериментальными данными для легких ионов вплоть до углерода. Однако данная формула оказалась неприменима для описания чувствительности пленки при регистрации более тяжелых ионов.

Таблица 2. Коэффициенты для функции падения интенсивности сигнала в зависимости от времени, прошедшего от облучения до сканирования

Тип пленки	A_1	B_1 , мин	A_2	B_2 , мин
BAS-MS	0.41 ± 0.03	214 ± 34	0.58 ± 0.03	120 150
BAS-TR	0.36 ± 0.03	50 ± 10	0.65 ± 0.03	2846 ± 556

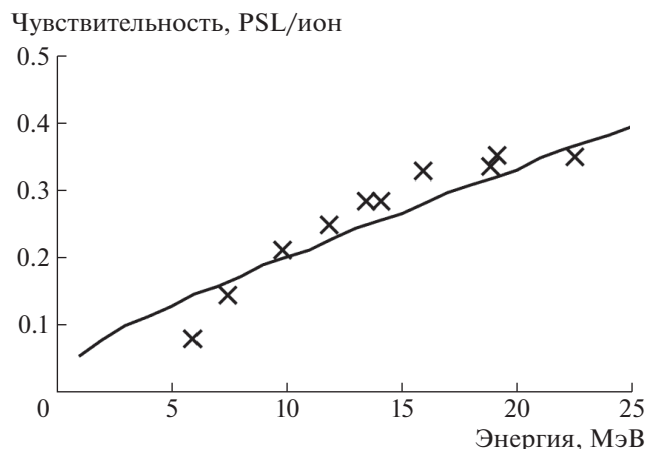


Рис. 6. Сравнение расчетных данных, полученных с помощью выражения (4) (сплошная кривая), и экспериментальных данных из работы [12] (крестики).

В работе [13] была проведена абсолютная калибровка детекторной пленки BAS-SR для ионов углерода, железа и ксенона. Для описания абсолютной чувствительности пленки было предложено модифицированное выражение:

$$PSL(E) = \int_0^w \frac{dE_{\text{dep}}}{dz} \left(\frac{Ae^{-z/L}}{1 + B|dE_{\text{dep}}/dz|} + C \right) dz, \quad (4)$$

где постоянная C не зависит от состава пленки и ее значение составляет 10^{-2} PSL/МэВ [13].

Проведенный в работе [13] расчет абсолютной чувствительности пленки BAS-SR показал хорошее согласие с экспериментальными данными, полученными для ионов серебра. Выражение (4) может быть использовано при расчете калибровочной зависимости пленок BAS-TR, BAS-MS, BAS-SR для широкого спектра ионов, включая тяжелые.

С использованием формулы (4) был также проведен расчет абсолютной чувствительности пленки BAS-TR для ионов титана, экспериментально измеренной в работе [12]. В данной работе с использованием масс-спектрометра Томсона и лазерно-индуцированной плазмы титана измерялась чувствительность пленки BAS-TR для ионов титана с зарядами от +10 до +12 в диапазоне энергий от 6 до 27 МэВ. Проведенное моделирование показало хорошее согласие (рис. 6) с экспериментальными данными, полученными в работе [12].

Поскольку, как уже упоминалось ранее, значения GL , получаемые при сканировании пленок с помощью медицинских сканеров, линейно зависят от PSL, выражения (2)–(4) применимы и для данных, записываемых в значениях GL . Таким образом, проведя абсолютную калибровку пленки BAS-TR в связке со сканером Durr Dental

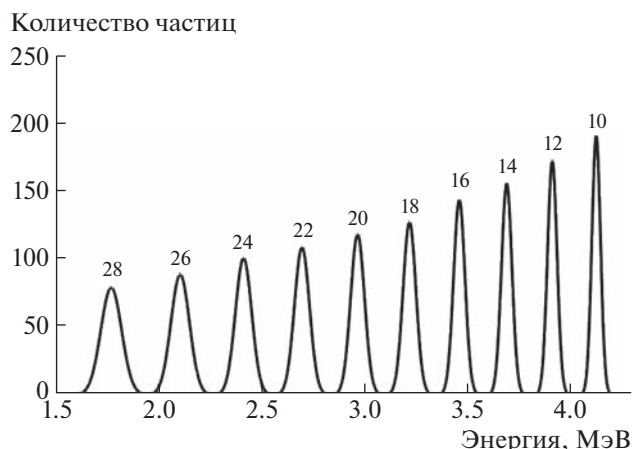


Рис. 7. Изменение спектра излучения источника α -частиц в зависимости от расстояния от источника (цифры у кривых, в миллиметрах), рассчитанное в программе SRIM2013.

MiniVista для легких ионов и вычислив коэффициенты A и C из формулы (4), можно рассчитать абсолютную чувствительность детекторной пленки для ионов различных типов.

В данной работе абсолютная калибровка чувствительности пленки BAS-TR при регистрации ионов в зависимости от энергии иона выполнялась с использованием радиоактивного источника α -частиц. Активность источника ^{239}Pu составляла $0.92 \cdot 10^5$ Бк (поток $4.15 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$), энергия α -частиц — 5.1 МэВ, площадь рабочей поверхности источника — 1 см^2 . Методика калибровки заключалась в измерении сигнала с пленки BAS-TR при различных расстояниях от источника излучения и одинаковом времени экспонирования. Изменение расстояния до источника позволяло проводить облучение пленки излучением с различным энергетическим спектром. При измерениях расстояние от источника варьировалось от 10 до 28 мм, что соответствовало изменению энергии α -частиц от 4.12 до 1.77 МэВ. На рис. 7 приведен результат расчета в программе SRIM2013 [19] изменения спектра излучения источника α -частиц в зависимости от расстояния до источника.

При облучении между радиоактивным источником и пленкой IP устанавливался коллиматор, изготовленный из гетинакса толщиной 1.2 мм с отверстием диаметром 9 мм. Пленка монтировалась на поверхности коллиматора, установленного на моторизованном вертикальном манипуляторе.

Облучение проводилось при времени экспозиции 5 мин, задержка от облучения до сканирования составляла 5 мин, что соответствовало падению сигнала около 3%. Для учета эффектов углового рассеяния, ведущего к уменьшению количества частиц, попадающих на детектор, было выполнено

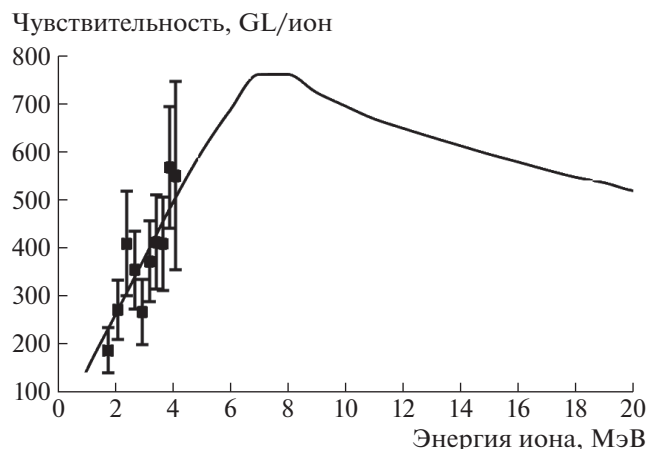


Рис. 8. Результаты абсолютной калибровки чувствительности детекторной пленки BAS-TR при облучении α -частицами. Квадраты — экспериментальные данные, сплошная кривая — рассчитанные значения.

моделирование методом Монте-Карло в среде Geant4 [20]. В процессе моделирования был использован стандартный физический пакет QGSP_BIC, в который включены электромагнитные и ядерные взаимодействия. Также был подключен низкоэнергетический физический пакет G4EmLivermorePhysics и процессы ядерного распада G4RadioactiveDecayPhysics.

Результаты калибровки пленки BAS-TR приведены на рис. 8. Полученные данные по чувствительности пленки BAS-TR позволили определить значение коэффициента A из формулы (4), которое составило 600 ± 180 GL/МэВ. С учетом полученного экспериментально значения A из формулы (4) было вычислено значение C , которое составило 25 ± 7.5 GL/МэВ.

Абсолютная калибровка чувствительности пленки BAS-MS для электронов выполнялась с использованием радиоактивного источника (изотоп $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) излучения β -частиц (максимум энергии 2.28 МэВ). Активность источника составляла $1.22 \cdot 10^7$ Бк (поток $4.51 \cdot 10^6$ с $^{-1}$), площадь рабочей поверхности источника 4 см 2 . Детекторная пленка размещалась на расстоянии 20 мм от источника, пучок электронов коллимировался диафрагмой диаметром 25 мм и толщиной 20 мм. Облучение проводилось за время экспозиции 5 мин, задержка от облучения до сканирования составляла 5 мин. Зарегистрированный суммарный по площади сигнал с пленки BAS-MS составил $(6.1 \pm 0.66) \cdot 10^{10}$ GL. С помощью среды моделирования Geant4 был рассчитан спектр и количество электронов, приходящих на пленку BAS-MS. Исходный спектр электронов в сравнении со спектром, попадающим на детекторную пленку, показан на рис. 9.

Зная форму спектра электронов на детектирующей пленке (рис. 9) и эффективную поглощенную энергию, рассчитанную в среде Geant4, для пленки BAS-MS в данном диапазоне энергий был рассчитан коэффициент α из ф-лы (2), который составил 2.64 ± 0.66 GL/кэВ. При этом проводилось сопоставление рассчитанного с помощью кода Geant4 интегрального значения количества электронов, пришедших на пленку BAS-MS, и экспериментально полученного интегрального по площади значения интенсивности в величинах GL. Калибровочная кривая абсолютной чувствительности пленки BAS-MS при регистрации электронов представлена на рис. 10.

Результирующие погрешности полученных калибровочных зависимостей складываются из погрешностей данных об интенсивности радиоактивных источников (22% для источников обоих типов), погрешности определения времени облу-

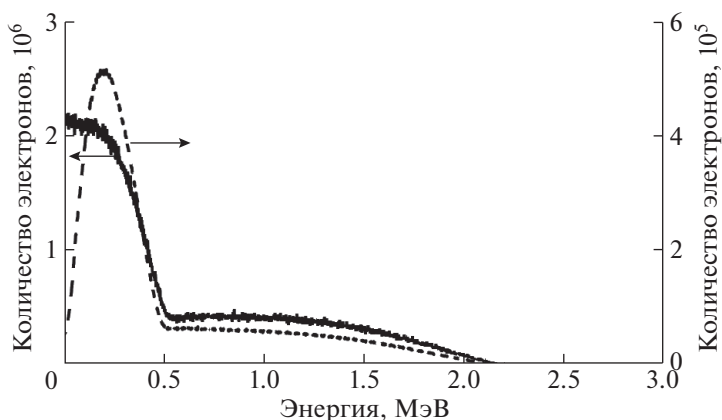


Рис. 9. Сравнение энергетического спектра электронов от источника $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ и спектра, попадающего на детекторную пленку. Сплошная кривая — исходный спектр ^{90}Sr , штриховая кривая — спектр электронов, приходящих на детектор.

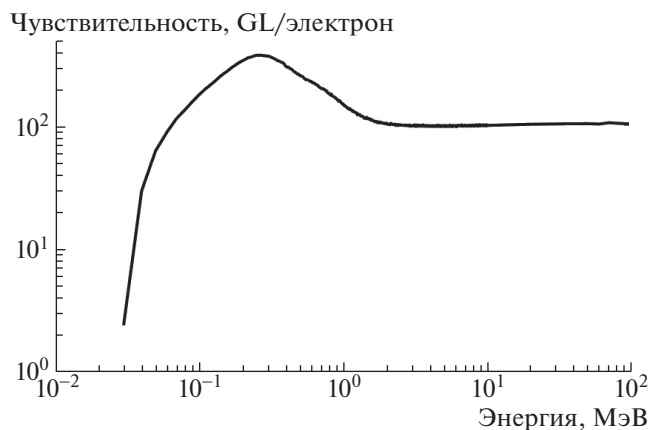


Рис. 10. Калибровочная кривая абсолютной чувствительности детекторной пленки BAS-MS для электронов.

чения пленки (~ 5 с), а также погрешности спада интенсивности сигнала в зависимости от времени, прошедшего от облучения до сканирования (выражение (1) и табл. 2). Для пленки BAS-TR и α -частиц также были рассчитаны погрешности определения энергии частиц, обусловленные как погрешностью расстояния от источника до детектора, так и статистическим разбросом энергии (ширина на полувысоте, FWHM). Таким образом, погрешность калибровки чувствительности пленки BAS-TR для α -частиц составила 30%, а для пленки BAS-MS и электронов – 25%.

При использовании детекторных пленок IP в составе магнитного спектрометра для определения спектров заряженных частиц от плазмы Z-пинча на установке “Ангара 5-1” необходимо учитывать различные углы падения электронов на плоскость регистрации [21]. Для учета этого эффекта с использованием моделирования методом Монте-Карло в среде Geant4 для электронов была рассчитана поглощенная в чувствительном слое пленки энергия при различных углах падения на пленку (рис. 11).

С использованием полученных данных моделирования с учетом углов падения на пленку была рассчитана результирующая кривая абсолютной калибровки пленки BAS-MS при регистрации электронов в составе магнитного спектрометра (рис. 12).

При регистрации пучков ионов на пленке BAS-TR для измерения спектров заряженных частиц с помощью магнитного спектрометра необходимо также учитывать различные углы падения на плоскость детектора. Однако в данном случае чувствительность пленки в спектрометре с учетом и без учета угла падения будет меньше различаться, в силу того что ионы, детектируемые разработанным спектрометром, имеют большую массу и

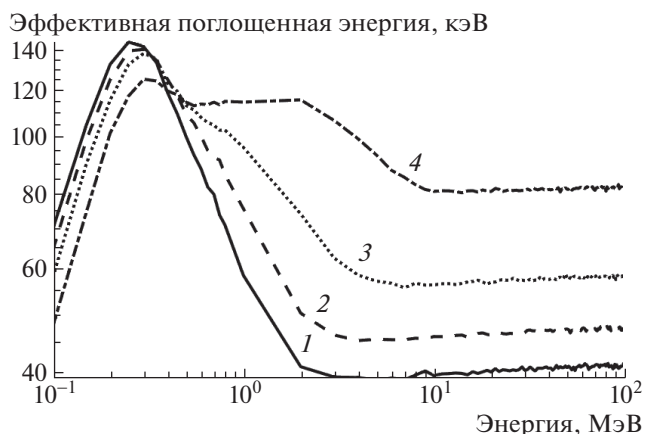


Рис. 11. Зависимость поглощенной энергии от энергии налетающего электрона при различных углах падения электрона на детектирующую пленку: 0° (1), 30° (2), 45° (3), 60° (4).

меньшую кинетическую энергию, что ведет к уменьшению длины пробега ионов (~ 60 нм при энергии ионов вольфрама 100 кэВ), а следовательно, к меньшему расхождению кривых чувствительности при учете угла падения (рис. 13).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнялась калибровка детекторных пленок Imaging Plates BAS-TR, BAS-MS для регистрации электронов и ионов при использовании сканера пленок Durr Dental Mini View. Построена калибровочная зависимость регистрируемых с помощью сканера значений ин-

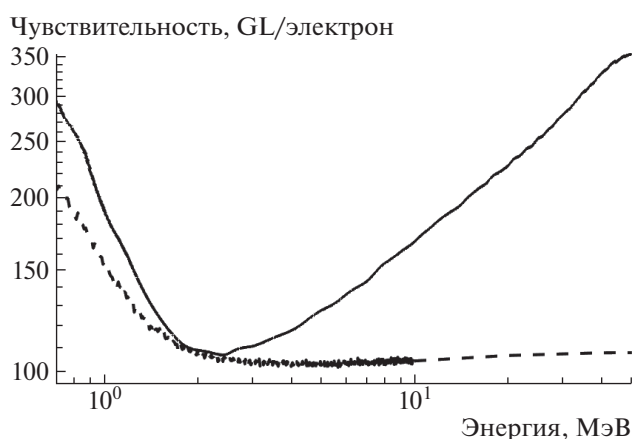


Рис. 12. Сплошная кривая — калибровочная зависимость абсолютной чувствительности детекторной пленки BAS-MS для электронов с учетом углов падения электронов при использовании в составе магнитного спектрометра; штриховая — чувствительность детекторной пленки BAS-MS без учета углов падения электронов.

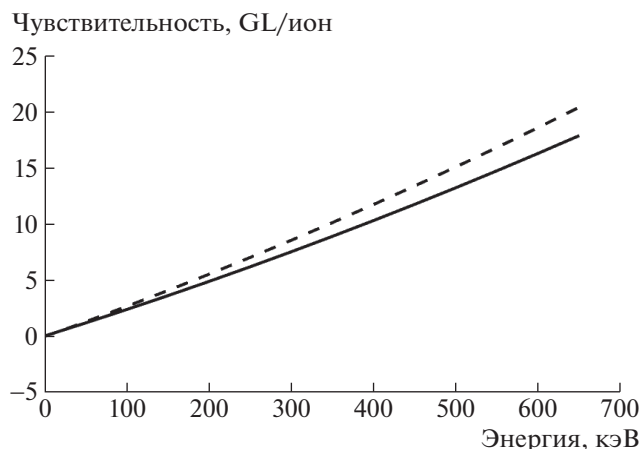


Рис. 13. Сплошная линия — калибровочная зависимость абсолютной чувствительности детекторной пленки BAS-TR для ионов вольфрама с учетом углов падения ионов при использовании в составе магнитного спектрометра; штриховая — чувствительность детекторной пленки BAS-TR без учета углов падения ионов.

тенсивности потока заряженных частиц от времени между облучением пленок и сканированием в диапазоне от нескольких минут до нескольких часов. С использованием радиоактивного источника α -частиц проведена калибровка IP BAS-TR, а с использованием источника β -частиц — пленки IP BAS-MS в зависимости от энергии заряженных частиц. В результате проведенной калибровки получены зависимости абсолютной чувствительности пленок BAS-TR и BAS-MS от энергии ионов и электронов. Точность калибровки для ионов составила 25%, а для электронов — 30%. С учетом изменения калибровочных зависимостей при различных углах падения частиц на пленку рассчитаны калибровочные зависимости при использовании детекторных пленок в составе магнитного спектрометра для регистрации спектров электронов в диапазоне энергий от 0.65 до 50 МэВ и ионов вольфрама в диапазоне энергий от 20 эВ до 650 кэВ от плазмы Z-пинча на установке “Ангара 5-1”.

Полученные в работе данные могут быть использованы для расчета калибровочных зависимостей пленок BAS-TR, BAS-MS, BAS-SR для широкого спектра энергий электронов и ионов различных типов, включая тяжелые.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке договора НИОКР № 17706413348210001380/226/3467-Д от 23 июня 2021 г. между АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ” и НИЦ “Курчатовский институт”—ИТЭФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miyahara J., Takahashi K., Amemiya Y., Kamiya N., Satow Y. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1986. V. 246. P. 572.
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(86\)90156-7](https://doi.org/10.1016/0168-9002(86)90156-7)
2. Amemiya Y., Miyahara J. // Nature. 1988. V. 336. P. 89.
<https://doi.org/10.1038/336089a0>
3. Tanaka K.A., Yabuuchi T., Sato T., Kodama R., Kitagawa Y., Takahashi T., Ikeda T., Honda Y., Okuda S. // Rev. Sci. Instrum. 2005. V. 76. P. 013507.
<https://doi.org/10.1063/1.1824371>
4. Boutoux G., Rabhi N., Batani D., Binet A., Ducret J.E., Jakubowska K., Nègre J.P., Reverdin C., Thfoin I. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 113304.
<https://doi.org/10.1063/1.4936141>
5. Singh S., Slavicek T., Hodak R., Versaci R., Pridal P., Kumar D. // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. P. 075105.
<https://doi.org/10.1063/1.4993921>
6. Bonnet T., Comet M., Denis-Petit D., Gobet F., Hannachi F., Tarisien M., Versteegen M., Aléonard M. // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 103510.
<https://doi.org/10.1063/1.4826084>
7. Bonnet T., Comet M., Denis-Petit D., Gobet F., Hannachi F., Tarisien M., Versteegen M., Aléonard M. // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 013508.
<https://doi.org/10.1063/1.4775719>
8. Freeman C.G., Fiksel G., Stoeckl C., Sinenian N., Canfield M.J., Graeper G.B., Lombardo A.T., Stillman C.R., Padalino S.J., Mileham C., Sangster T.C., Frenje J.A. // Rev. Sci. Instrum. 2011. V. 82. P. 073301.
<https://doi.org/10.1063/1.3606446>
9. Doria D., Kar S., Ahmed H., Alejo A., Fernandez J., Cercez M., Gray R.J., Hanton F., MacLellan D.A., McKenna P., Najmudin Z., Neely D., Romagnani L., Ruiz J.A., Sarri G., Scullion C., Streeter M., Swantusch M., Willi O., Zepf M., Borghesi M. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 123302.
<https://doi.org/10.1063/1.4935582>
10. Kojima S., Miyatake T., Inoue S., Dinh T.H., Hasegawa N., Mori M., Sakaki H., Nishiuchi M., Dover N.P., Yamamoto Y., Sasaki T., Ito F., Kondo K., Yamanaka T., Hashida M., Sakabe S., Nishikino M., Kondo K. // Rev. Sci. Instrum. 2021. V. 92. P. 033306.
<https://doi.org/10.1063/5.0035618>
11. Won J., Song J., Palaniyappan S., Gautier D.C., Jeong W., Fernández J.C., Bang W. // Appl. Sci. 2021. V. 11. P. 820.
<https://doi.org/10.3390/app11020820>
12. Strehlow J., Forestier-Colleoni P., McGuffey C., Bailly-Grandvaux M., Daykin T.S., McCary E., Peebles J., Revet G., Zhang S., Ditmire T., Donovan M., Dyer G., Fuchs J., Gaul E.W., Higginson D.P. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. P. 083302.
<https://doi.org/10.1063/1.5109783>
13. Nishiuchi M., Sakaki H., Dover N.P., Miyahara T., Shiokawa K., Manabe S., Miyatake T., Kondo K., Kondo Ke., Iwata Y., Watanabe Y., Kondo Ki. // Rev. Sci. In-

- strum. 2020. V. 91. P. 093305.
<https://doi.org/10.1063/5.0016515>
14. Zeil K., Kraft S.D., Jochmann A., Kroll F., Jahr W., Schramm U., Karsch L., Pawelke J., Hidding B., Pretzler G. // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. P. 013307.
<https://doi.org/10.1063/1.3284524>
15. Ingenito F., Andreoli P., Batani D., Boutoux G., Cipriani M., Consoli F., Cristofari G., Curcio A., De Angelis R., Di Giorgio G., Ducret J., Forestier-Colleoni P., Hulin S., Jakubowska K., Rabhi N. // JINST. 2016. V. 11(5). P. C05012.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/05/C05012>
16. <https://www.duerdental.com/en/products/imaging/intraoral-diagnostics/vistascan-mini-view/>
17. Nave G., Sansonetti C.J., Szabo C.I., Curry J.J., Smilie D.G. // Rev. Sci. Instrum. 2011. V. 82. P. 013107.
<https://doi.org/10.1063/1.3529879>
18. Lelasseux V., Fuchs J. // JINST. 2020. V. 15. P. 004002.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/04/P04002>
19. <http://www.srim.org/>
20. <http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/fo/BookForApplicationDevelopers.pdf>
21. Chen H., Back N.L., Bartal T., Beg F.N., Eder D.C., link A. J., MacPhee A.G., Ping Y., Song P.M., Throop A., Van Woerkom L. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. P. 033301.
<https://doi.org/10.1063/1.2885045>