



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»**

Препринт 2024–10

**А.П. Воробьёв¹, А.Г. Васильева¹, С.Н. Головня¹,
А.П. Солдатов¹, К.В. Сухарев¹, О.П. Толбанов²,
А.В. Тяжев², А.Е. Винник², М.С. Скакунов², А.Н. Зарубин²**

**Сапфировые дозиметрические сенсоры для лучевой
терапии пучками ионов углерода**

¹ НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, Протвино

² Томский государственный университет, Томск

Протвино 2024

Аннотация

Воробьев А.П. и др. Сапфировые дозиметрические сенсоры для лучевой терапии пучками ионов углерода: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ 2024–10. - Протвино, 2024. – 15 с., 9 рис., 2 табл., библиогр: 13.

В настоящей работе представлены результаты первых испытаний сапфировых сенсоров на пучке ионов углерода с энергией 185 и 380 МэВ/нуклон. Измерены зависимости сигналов сенсоров от приложенного высокого напряжения от 50 до 500В, зависимости сигналов от интенсивности пучка ионов углерода. Используя радиохромную плёнку ЕВТ-3, установленную перед сапфировыми сенсорами, измерено соотношение между поглощённой дозой в плёнке и суммарным зарядом, зарегистрированным сенсорами. Измерена зависимость величины сигналов сенсоров при напряжении на них 500В при постоянной интенсивности пучка после облучения дозой, регистрируемой относительным дозиметром. Впервые для сапфировых сенсоров измерена зависимость дифференциальной поглощённой дозы в водном фантоме (кривая Брэгга), Сигналы с детекторов измерялись при напряжении на детекторах 500В и времени интегрирования 900 мс в интервале интенсивностей $7,0 \cdot 10^7 \div 4,5 \cdot 10^8$ ионов/импульс.

Abstract

Vorobiev A.P. et al. Sapphire dosimetric sensors for carbon ion beam radiation therapy: NRC «Kurchatov Institute» - IHEP Preprint 2024–10. – Protvino, 2024. – p. 15, fig. 9, tables 2, refs: 13.

The paper presents the results of the initial tests of sapphire sensors with a carbon ion beam at energies of 185 and 380 MeV/nucleon. The dependencies of the sensor signals on the applied high voltage ranging from 50 to 500 V and the intensity of the carbon ion beam have been measured. Using the radiochromic film EBT-3 placed in front of the sapphire sensors, the relationship between the absorbed dose in the film and the total charge registered by the sensors was determined. The dependence of the sensor signals at a voltage of 500 V under constant beam intensity after irradiation with a dose, measured by a relative dosimeter, was also evaluated. For the first time, the relationship between the differential absorbed dose in a water phantom (Bragg curve) was measured for the sapphire sensors. Signals from the detectors were recorded at a voltage of 500 V and an integration time of 900 ms within the intensity range of $7,0 \cdot 10^7 \div 4,5 \cdot 10^8$ ions/pulse.

Введение

Возможность использование детекторов из монокристаллического искусственного сапфира в технологии дистанционной лучевой адронной терапии (протоны, ионы) следует из сопоставления параметров пучков протонов и ионов углерода, используемых в адронной терапии онкологических заболеваний (энергия протонов 70-220 МэВ/нуклон, ионов углерода 120 – 430 МэВ/нуклон, интегральная поглощённая доза в опухоли 20-120Гр), с результатами, известными к настоящему времени: исследований транспорта носителей зарядов в искусственных сапфирах [1] и исследований характеристик сенсоров при облучении бета – частицами и тяжёлыми ионами [2 - 5]. Использование сапфировых сенсоров перспективно из-за их более высокой радиационной стойкости [6] по сравнению с сенсорами из кремния и легированного хромом арсенида галлия [7,8], менее выраженными эффектами поляризации по сравнению с сенсорами на алмазе [3]. Кроме того, низкие токи утечки, высокая радиационная стойкость, близкая тканеэквивалентность ($Z_{эфф} = 4,08$) при небольших размерах позволяют рассматривать этот материал как приемлемый для создания детекторов небольшого объёма с высоким пространственным разрешением для оперативных измерений дозовых полей с непосредственным съёмом информации с детекторов без дополнительной обработки материалов, как это необходимо делать с пассивными детекторами (радиохромными плёнками и ТЛД дозиметрами). Дополнительным преимуществом сапфировых сенсоров является их относительно низкая стоимость и доступность монокристаллических пластин больших размеров нужного качества от отечественных и зарубежных изготовителей.

В настоящей работе представлены результаты исследования электрофизических и дозиметрических характеристик сенсоров из монокристаллического искусственного сапфира на пучке ионов углерода с энергией 185 и 380 МэВ/нуклон.

1. Материал сенсоров

В работе использованы сенсоры, изготовленные из пластины монокристаллического искусственного сапфира толщиной 150 мкм путем электронно-лучевого нанесения алюминиевых контактов толщиной 1 мкм с последующим травлением под фо-

торезистивной маской и резкой на отдельные кристаллы. Габариты сенсора составляют $4.0 \times 4.0 \text{ мм}^2$, при этом площадь верхнего контакта $1.8 \times 1.8 \text{ мм}^2$, площадь нижнего контакта $4.0 \times 4.0 \text{ мм}^2$. Проверка чувствительности сенсоров к излучению осуществлялась путем измерения фототока при облучении их источником рентгеновского излучения. В качестве источника использовалась микрофокусная рентгеновская трубка с вольфрамовым анодом.

В научных публикациях можно найти следующие характеристики монокристаллического искусственного сапфира (Таблица 1), полученного методом Чохральского, с суммарной концентрацией примесей несколько десятков ppm.

Таблица 1. Характеристики монокристаллического искусственного сапфира

Плотность, г/см ³	3,98
Твёрдость по шкале Мооса	9
Диэлектрическая константа (зависит от ориентации оси кристалла)	11,5/9,3 (параллельно/перпендикулярно оси – С (001))
Удельное сопротивление, Ом•см при 20 ⁰ С	$10^{15} \div 10^{16}$
Напряжение пробоя, В/см	$4 \cdot 10^5 - 10^6$
Теплопроводность Вт/(м•К ⁰)	46,06
Ширина запрещённой зоны, эВ	9,9
Энергия ионизации, эВ	27-29,7
Мобильность электронов, см ² /(В•с) при 20 ⁰ С	600
Средние энергетические потери для минимально - ионизирующей частицы (МИП), МэВ/(г•см ²)	1,65
Число eh пар, образуемых МИП на одном микроне пробега	22

2. Измерения на пучке ионов углерода

Измерения выполнены на пучке ионов углерода временного радиобиологического стенда (ВРБС) НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ [9]. Энергия пучка ионов углерода в месте размещения сапфировых сенсоров ~ 380 МэВ/нуклон. Схема размещения оборудования на пучке приведена на рисунке 1.

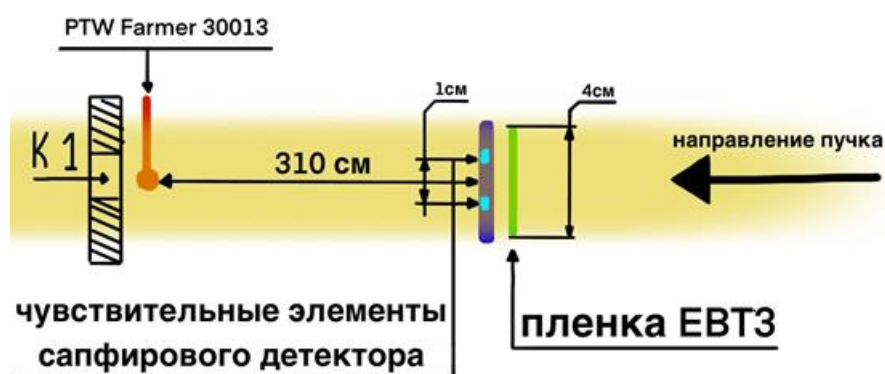


Рис. 1. Схема размещения оборудования на пучке. К1 – коллиматор, перед поглотителем пучка.

Два сенсора на мезонинной плате устанавливались на расстоянии 3,1 м от дозиметра РТW, использовавшегося в качестве относительного монитора. Размер пучка в месте размещения сенсоров диаметром 40 мм (на уровне 3-х RMS). Расстояние между сенсорами поперёк пучка 10 мм. Радиохромная плёнка (ЕВТ-3) закреплялась вплотную к мезонинной плате с сенсорами.

Для проведения испытаний образцов сенсоров на пучке использовалась измерительная система, включающая в себя: блок фронт-энд электроники, персональный компьютер, крейт КАМАК и программное обеспечение, осуществляющее контроль измерительной системы, сбор, визуализацию и хранение полученных экспериментальных данных. Блок фронт-энд электроники включает в себя: 2-х канальный усилитель-интегратор АСF2101 с возможностью подключения внешней интегрирующей емкости, 16-ти разрядный амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП), управля-

ющий микроконтроллер, интерфейс RS232 и мезонинную плату с размещенными на ней двумя сапфировыми сенсорами. Мезонинная плата устанавливалась сенсорами в центре пучка ионов углерода с использованием лазерных визиров. Крейт КАМАК и персональный компьютер находились в домике экспериментаторов вне экспериментальной зоны и соединялись с блоком фронт-энд электроники кабелем длиной 30м. Из домика осуществлялось также высоковольтное питание сенсоров и управление им. Контроллер Q-Bus КАМАК используется для временной синхронизации работы системы сбора данных экспериментальной установки и системы вывода пучка ионов углерода из ускорителя.

2.1. Калибровка системы сбора данных на стенде

Т.к. сенсоры будут работать в интегрирующем – токовом – режиме и сигналом будет ток свободных носителей, образующихся при прохождении через них ионов углерода, то для системы сбора данных была выбрана схема калибровки с подачей на вход усилителей -интеграторов постоянного тока изменяемой в процессе калибровки величины. К входным цепям интеграторов были подсоединены внешние нагрузочные сопротивления номиналом 2469 кОм и 2379 кОм. Цепи сенсор – интегратор не разрывались, т.к. сенсор имеет очень большое (фактически разрыв цепи) сопротивление и током утечки ($\sim 1\text{pA}$) через него можно пренебречь. Ток, имитировавший отклик сенсора от прохождения через него пучка ионов углерода во время сброса пучка создавался путем подачи на указанные сопротивления уровней напряжения от прецизионного источника. Диапазон напряжений был выбран: от 0 до 0.55В для времени интегрирования 900мс; и от 0 до 1,6В для времени интегрирования 300мс. Напряжение на сенсоры подавалось от высокостабильного управляемого источника напряжения Keithley 6487. Время интегрирования 900мс использовалось при работе на пучке ионов углерода.

Калибровочные зависимости вида «напряжение на источнике – канал АЦП» для первого и второго каналов АЦП (для обоих сенсоров) приведены на рисунке 2. По оси X отложены значения поданного на резисторы напряжения в вольтах, по оси Y отклик системы в первом и втором каналах АЦП в единицах каналов АЦП.

Калибровка измерительного тракта для времени интегрирования 900мс

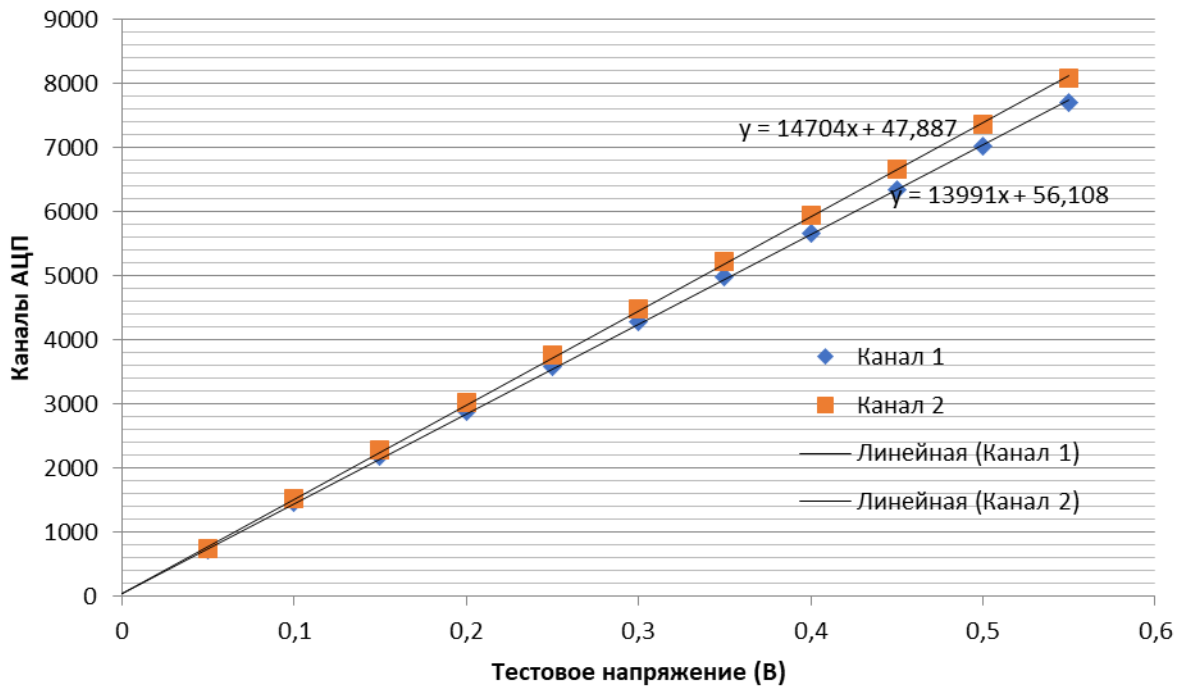


Рис. 2. Калибровочная зависимость АЦП для времени интегрирования 900мс.

Система демонстрирует хорошую линейность во всем диапазоне измерений. Различие между углами наклона связано с незначительным различием в номиналах интегрирующих емкостей и нагрузочных сопротивлений. Ошибка измерения (стандартное отклонение) составляет от 0.6 бины до 1.13 бины АЦП, что не выходит за габарит точек на графике.

Практический интерес для работы системы представляет зависимость «канал АЦП – собранный заряд», используемая для оценки уровня сигнала с сенсоров. Эту зависимость можно вычислить, зная три величины – напряжение источника питания, номинал нагрузочного сопротивления и время интегрирования. Результаты расчёта для обоих каналов и времени интегрирования в 900 мс приведены на рисунке 3:

Калибровка измерительного тракта для времени интегрирования 900 мс

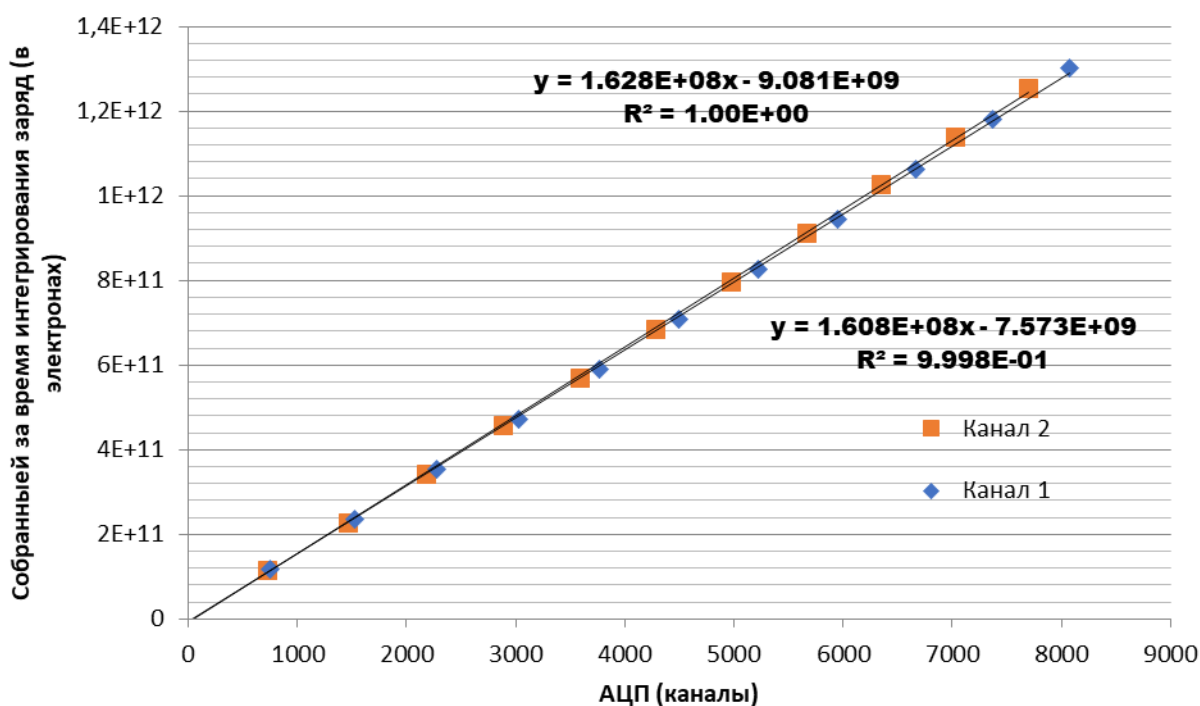


Рис. 3. Зависимость «канал АЦП – собранный заряд»,

А обобщенные результаты для обоих каналов и времен интегрирования 300 и 900 мс приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Калибровка каналов детектора.

		Цена канала АЦП
Канал 1	300 мс	$1,634 * 10^8$ (26,14pC)
	900 мс	$1,628 * 10^8$ (26,10 pC)
Канал 2	300 мс	$1,615 * 10^8$ (25,84pC)
	900 мс	$1,608 * 10^8$ (25,76pC)

При этом отношение каждой пары «Цена» канала АЦП для разных интервалов интегрирования имеют близкие значения, отличающиеся в обоих сенсоров на величину менее 0,5%, что свидетельствует о корректности работы системы измерений при переходе от одной длительности временного интервала сбора заряда к другой.

2.2. Измерения на пучке ионов углерода с энергией ионов 380 МэВ/нуклон

Измеренная величина сигналов с сенсоров при разных напряжениях и постоянной интенсивности пучка ионов, т.е. в зависимости от напряжения электрического поля в детекторах приведено на рисунке 4. Интенсивность пучка ионов углерода определялась по монитору интенсивности пучка в канале транспортировки пучка - ионизационной камере и составила в среднем $\sim 4 \cdot 10^8$ ионов/импульс вывода. Точность определения интенсивности ионизационной камерой не хуже 5%.

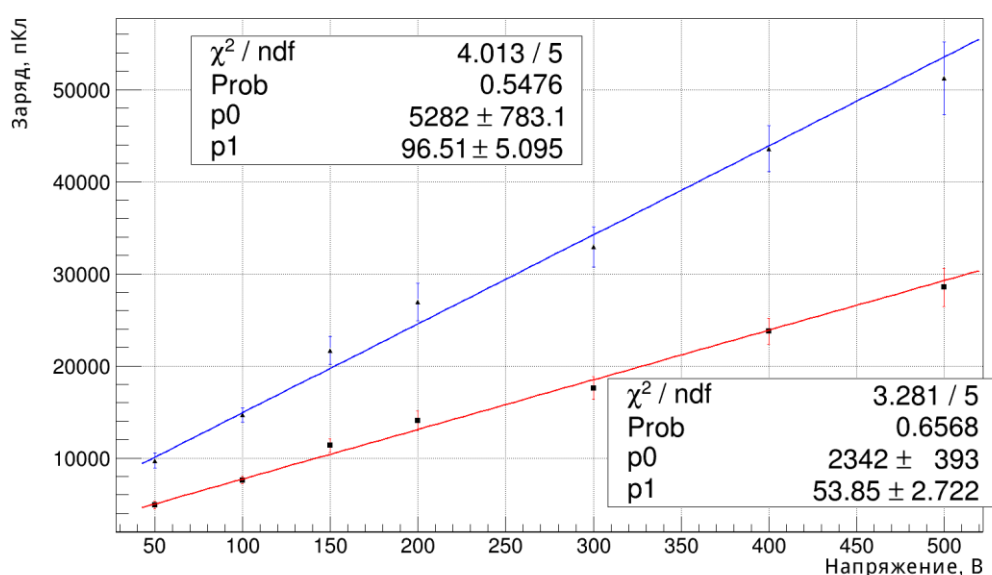


Рис. 4. Зависимость сигнала с сенсоров от приложенного напряжения.

Для получения зависимости (Рис.4) для каждого напряжения, поданного на сенсоры, вычислялась средняя величина сигнала и её ошибка по серии из 10 измерений. Для повышения точности измерений и стабильности результата производилась предварительная отбраковка данных. Измерения с пониженной интенсивностью пучка (на 10% и более) в расчёт не принимались и из дальнейшей обработки исключались. Зависимость сигнала с сенсоров от приложенного напряжения линейная. Нормированные на величину сигнала отклонения от прямолинейной зависимости не превышают 5%, за исключением сигнала при напряжении 50В, которое, примерно, в два раза больше.

Зависимость сигнала с детекторов от средней интенсивности пучка измерялась при напряжении на сенсорах 500В и времени интегрирования 900мс в интервале интенсивностей $7,0 \cdot 10^7 \div 4,5 \cdot 10^8$ ионов/импульс. Результаты этих измерений приведены на рисунке 5.

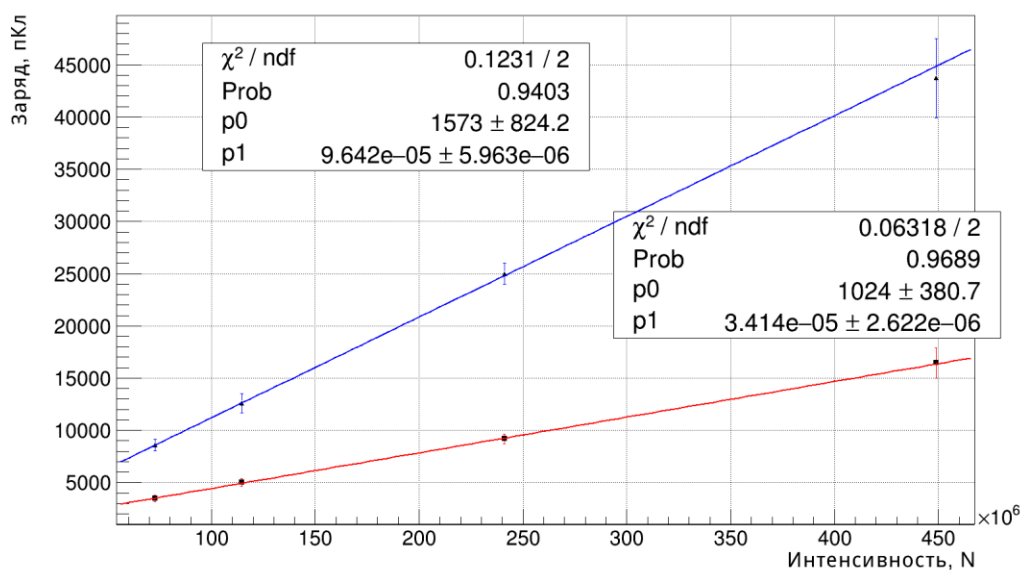
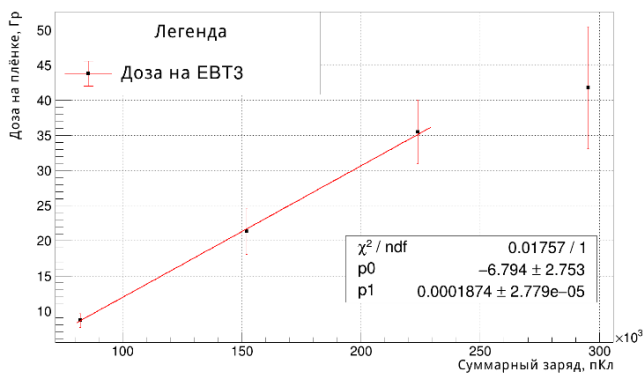


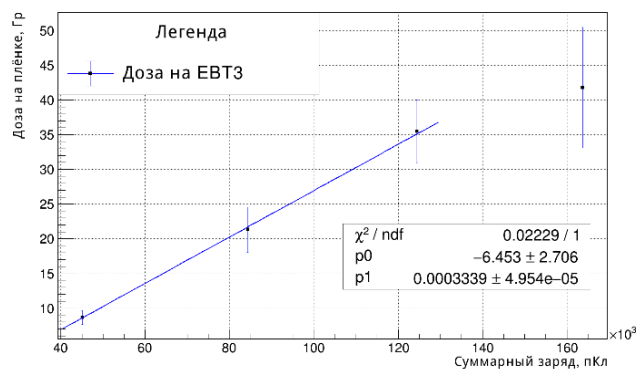
Рис. 5. Зависимость сигналов с сенсоров от интенсивности пучка ионов.

Зависимость сигнала с сенсоров от интенсивности пучка линейная. Нормированные на величину сигнала отклонения от прямолинейной зависимости не превышают 3%.

Используя радиохромную плёнку ЕВТ-3, установленную перед сапфировым сенсором (см. Рис.1), измерено соотношение между поглощённой дозой в плёнке и суммарным зарядом, зарегистрированным сапфировым сенсором. Измеренное соотношение приведено на рисунке 6а и рисунке 6б.



а) Канал 1.



б) Канал 2.

Рис. 6. Корреляция поглощённой дозы в плёнке ЕВТ-3 и зарегистрированного заряда в сапфировом сенсоре.

Для менее чувствительного сенсора эта зависимость приведена на рисунке 6б.

Обработка плёнки и измерение поглощённой дозы в плёнке ЕВТ-3 выполнены по стандартным процедурам [10]. Поглощённая доза в плёнке измерялась в квадрате $4 \times 4 \text{ мм}^2$, расположенном перед сапфировым сенсоров. Как видно из рисунка, в рабочем диапазоне поглощённых доз для плёнки ЕВТ-3 до 35Гр накапливаемые заряды в сапфировых сенсорах линейно возрастают.

Корреляция поглощённой дозы в плёнке ЕВТ-3 до 35Гр и зарегистрированного заряда в сапфировых сенсорах линейная. Нормированные на величину дозы в этом интервале отклонения от прямолинейной зависимости не превышают 2%.

На рисунке 7 приведена зависимость величины сигнала сенсоров при напряжении на них по 500В и постоянной интенсивности $\sim 1,3 \cdot 10^8$ ионов/импульс вывода пучка после облучения дозой, регистрируемой относительным дозиметром РТW. Величина сигналов сенсоров после их облучения в пределах ошибок не меняется.

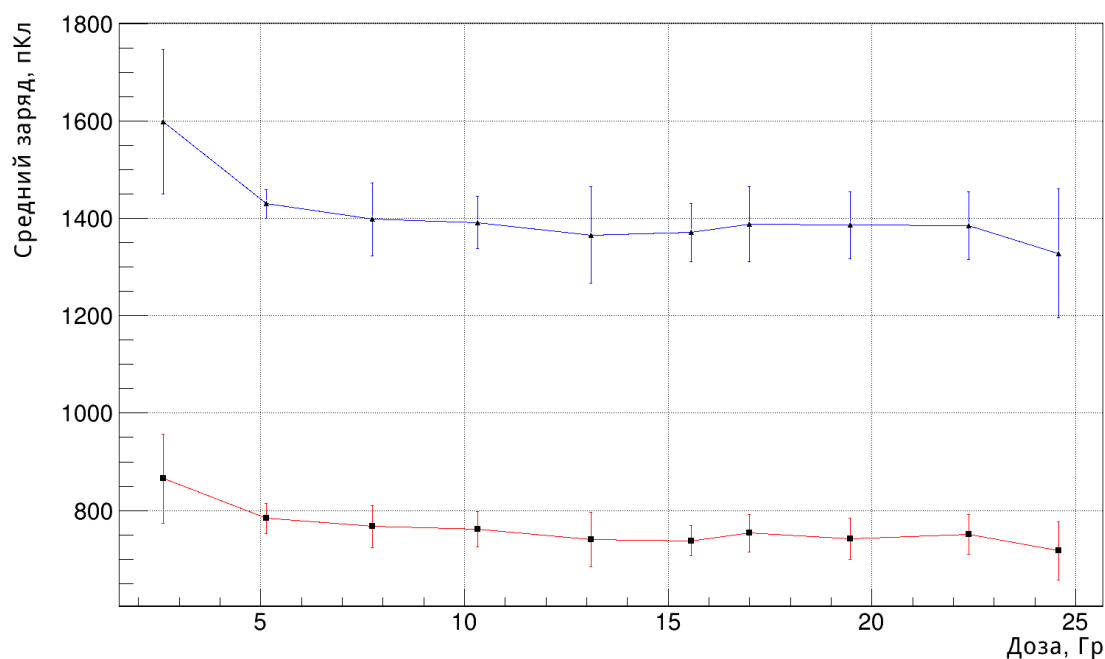


Рис. 7. На вертикальной оси – средний сигнал, снимаемый с сенсоров.

На горизонтальной оси – показания дозиметра РТW.

3. Измерение функции передачи энергии в водном фантоме сапфировыми сенсорами. Измерение пика Брэгга

Для измерений используется водный фантом (Рис. 8), который представляет собой контейнер с внешними размерами 590×360×375 мм, заполненный водой. Материал стенок фантома — поликарбонат. Толщина входного окна составляет 3 мм, задней и боковых стенок — 15 мм. Внутри контейнера размещен кессон. Внешние размеры кессона - 130×240×265 мм, толщина передней стенки — 5 мм (оргстекло), задней и боковых стенок — 15 мм (поликарбонат). Изменение положения кессона по пучку ионов углерода внутри фантома осуществляется высокоточной автоматизированной системой 3-х координатного перемещения [11, 12]. Сапфировые сенсоры размещались в кессоне, около передней его стенки и выставлялись по пучку лазерными визирами, суммарная толщина пластика перед сенсором составила 8мм. При этом в процессе измерения вдоль оси распространения пучка шаг перемещения изменялся от 10мм до 100мкм, что соответствовало измерениям величины удельных

ионизационных потерь энергии ионов в области плато и в области пика функции Брэгга.



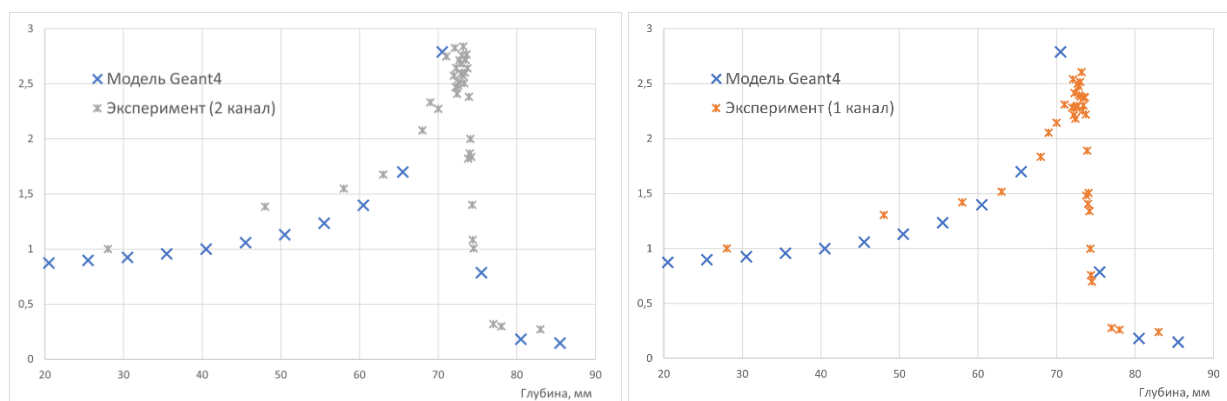
Рис. 8. Фотография водного фантома на пучке [11].

Для проведения измерений использовалась описанная выше электроника системы оцифровки сигналов с сапфировых сенсоров и сбора данных. В качестве монитора пучка использовалась ионизационная камера PTW Farmer 30013, которая была установлена в пучке перед фантомом и не «затеняла» сапфировый сенсор. Для исключения влияния нестабильности интенсивности пучка от импульса к импульсу, амплитуда сигнала нормировалась на показания PTW детектора. Для компенсации изменения распределения частиц в поле пучка в процессе измерений в каждой точке проводилось по 3 измерения, которые затем усреднялись.

Измеряемая функция передачи энергии (функция Брэгга) — это одномерная функция дозового распределения в воде от широкого пучка ионов углерода. Она зависит от ионизационных потерь, определяемыми фундаментальными переменными функции Бетте-Блоха [13], энергетического разброса частиц в пучке, поперечного размера пучка, расстояния до фокуса пучка, разброса пробегов частиц (straggling), вклада ядерных взаимодействий пучка и, наконец, от используемого для измерения детектора. Выполнить точный теоретический расчёт формы пика Брэгга практически невозможно. Поэтому экспериментальные измерения этой функции очень важны для

разработки устройства модификации пучка (пучкового фильтра) для получения модифицированного пика Брэгга, т.е. продольного профиля дозового поля.

На рисунке 9 приведены графики сравнения измеренной энергопотери пучка ионов углерода для двух сенсоров с моделированием пакетом Geant4 (версия: 10.7-release).



а) Канал 1.

б) Канал 2.

Рис. 9. Экспериментальные и моделированные энергопотери ионов углерода в воде.

Одним из факторов, который влияет на высоту пика Брэгга, является положение фокуса пучка. На высоту пиков влияют также ядерные взаимодействия, которые уменьшают его высоту и увеличивают вклад в энергетические потери ионов перед пиком, и за пиком Брэгга. Ширина же его увеличивается из-за разброса пробегов частиц (straggling). В нашем случае отношение энергетических потерь в пике Брэгга к начальной точке составляет примерно 2,8.

Т.к. измерения были выполнены в широком пучке (диаметром 40мм), а размер сенсора $4 \times 0,15 \text{ мм}^2$, то его влияние на результаты измерений незначительно.

Измерение пика Брэгга некалиброванным сенсором даёт правильный ответ о пробеге частиц пучка в водном фантоме и относительную величину дозового распределения. Используя измеренные данные по положению пика Брэгга (R80 – точка, где энергопотеря составляет 80% от максимума за пиком) была оценена энергия пучка перед стенкой водного фантома. Её величина составила $\sim 185 \text{ МэВ/нуклон}$. Расчёт проводился методом Монте-Карло по программе GEANT 4. Погрешность

оценки энергии пучка составила 1.5%. В нашем случае эта точность определяется точностью фиксации сапфирового сенсора и точностью перемещения манипулятора, суммарная величина которых не превышает 5мм.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характеристики сапфировых сенсоров, подтвержденные результатами выполненных исследований, делают их привлекательными для верификации планов облучения и контроля качества лучевой терапии. Сенсоры способны выдерживать дозы облучения, используемые в лучевой терапии ионами углерода, без ухудшения своих характеристик.

Стабильность и чувствительность сапфировых сенсоров обеспечивают точное и надежное измерение доз лучевого облучения пучками ионов углерода, что важно для эффективного проведения процедур лучевой терапии. Анализ перспектив использования сапфировых сенсоров в контроле качества лучевой терапии онкологических заболеваний подчеркивает их значимость как инновационного инструмента для лучевой терапии.

Выполненные исследования сапфировых сенсоров позволяют приступить к созданию как «точечных» (point - like) детекторов для контроля больших дозовых полей, так и для изготовления матричных детекторов для измерения размеров, формы и дозовых профилей пучков ионов, выполняя измерения в режиме реального времени, т.е. on-line.

Список литературы

- [1] F. Wang et al., Electronic Charge Transport in Sapphire Studied by Optical-Pump/THz-Probe Spectrometer, SPIE Proceedings, 2004
- [2] Alexander Ignatenko, Development of Beam Halo Monitors for the European XFEL using radiation hard sensors and Demonstration of the Technology at FLASH, Dissertation Doctors der Naturwissenschaften, Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, 14.04.2004
- [3] O. Karacheban et al., Investigation of a direction sensitive sapphire detector stack at the 5 GeV electron beam at DESY-II, Journal of Instrumentation 10, 08 (2015) P08008, doi:10.1088/1748-0221/10/08/P08008
- [4] А.В. Ефимов, Наноразмерные эффекты на поверхности монокристаллов Al_2O_3 и MgO , вызванные тяжёлыми ионами высоких энергий, Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Дубна – 2004 г
- [5] Ю.С. Ефимов Пьезоспектроскопический анализ механических напряжений в Al_2O_3 , вызванный воздействием высокоэнергетических ионов. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Дубна – 2019 г
- [6] Florian Robert Kassel, The Rate Dependent Radiation Induced Signal Degradation of Diamond Detectors, Dissertation Doctors der Naturwissenschaften, Karlsruher Institute für Technologie, 27.01.2017, IEKP - KA / 2017-19
- [7] С.С. Хлудков, О.П. Толбанов, М.Д. Вилисова, И.А. Прудаев, Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами, стр. 257, Томск ТГУ, 2016, под редакцией проф. Толбанова О.П., ISBN 978-5-9421-556-5
- [8] U.Kruchonok et al, Radiation hardness of GaAs:Cr and Si sensors irradiated by 21MeV electron beam, 2020 Journal of Instrumentation 15 C06003, doi:10.1088/1748-0221/15/06/C06003
- [9] Ю.М. Антипов, А.П. Солдатов, СОЗДАНИЕ ЦЕНТРА ИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ, Журнал Медицинская физика, 2016, №2 (70), с. 5-9.
- [10] Gafchromic EBТ3. <http://www.gafchromic.com/gafchromic-film/radiotherapy-films/EBT/index.asp> (дата обращения: 05.11.2022 г.).

[11] Ю. М. Антипов, А. Г. Васильева и др., Статус экспериментальной установки Радиобиологический стенд (РБС) на выведенном пучке ядер углерода из ускорительного комплекса У-70, в сборнике Докладов международной конференции, РУПАК – 2023, Новосибирск, сентябрь 2023.

[12] Д.А. Васильев, А.В. Кошелев и др., Сопровождение облучений ионами углерода при проведении радиобиологических экспериментов на установке РБС, в сборнике Докладов международной конференции, РУПАК – 2023, Новосибирск, сентябрь 2023.

[13] Schardt D. et al, Heavy-ion tumor therapy: Physical and radiobiological benefits, Reviews of Modern Physics, 2010, v.82, n.1, p. 383-425.

Рукопись поступила 5 августа 2024 г.

Воробьев А.П. и др.

Сапфировые дозиметрические сенсоры для лучевой терапии пучками ионов углерода.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 07.08.2024 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1,25. Уч.– изд.л. 1,6. Тираж 60. Заказ 7. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

142281, Московская область, г. Протвино, пл.Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2024-10,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2024
