

УДК 539.1.074

## РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ АДРОННЫХ ПУЧКОВ

© 2022 г. А. А. Григорьева<sup>1,\*</sup>, А. А. Булавская<sup>1</sup>, Е. А. Бушмина<sup>1</sup>, И. А. Милойчикова<sup>1,2</sup>, С. Г. Стучебров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050 Россия*

<sup>2</sup> *Научно-исследовательский институт онкологии Томского национального исследовательского медицинского центра Российской академии наук, Томск, 634009 Россия*

*\*e-mail: agrigorieva@tpu.ru*

Поступила в редакцию 01.08.2022 г.

После доработки 06.08.2022 г.

Принята к публикации 09.08.2022 г.

С внедрением в клиническую практику медицинских ускорителей протонов и ионов встает вопрос о разработке более точных и надежных устройств для диагностики параметров облучения. Для осуществления процедур лучевой терапии высокоэнергетическими пучками тяжелых заряженных частиц необходимы высокоточные системы мониторинга для определения интенсивности, положения и пространственного распределения терапевтического пучка в реальном времени с минимальным возмущением потока частиц. Существующие измерительные системы не отвечают всем необходимым требованиям, в связи с чем, задача разработки детектирующего устройства для регистрации пространственных и энергетических характеристик протонных и ионных пучков становится актуальной. Данная работа направлена на разработку детектирующего устройства для измерения поперечного распределения интенсивности адронных пучков. Разрабатываемый детектор должен позволить реализовать метод многоугольного сканирования, который ранее был предложен авторами и успешно апробирован на рентгеновских и электронных пучках. В результате была предложена схема разрабатываемого детектора, на основе которой было собрано детектирующее устройство, рабочим телом которого стало тонкое сцинтилляционное оптоволокно, пригодное для регистрации высокоэнергетических адронных пучков. Разработанный детектор был апробирован на протонном пучке и на пучке ионов углерода. Были получены сравнения горизонтальных профилей протонного и ионного пучков для разных энергий, измеренных с помощью разработанного и пленочного детекторов. В результате работы было показано, что разработанный детектор является пригодным для измерения интенсивности высокоэнергетических протонных и ионных пучков в поперечном сечении пучка.

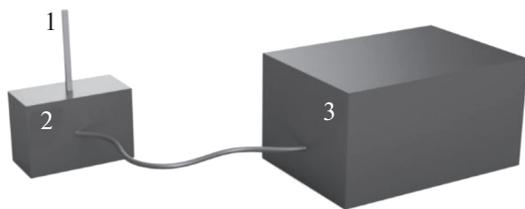
*Ключевые слова:* диагностика пучков, детектор, поперечный профиль, многоугольное сканирование, сцинтилляционное оптоволокно, медицинский пучок, протонная лучевая терапия, ионная лучевая терапия

DOI: 10.56304/S2304487X22020043

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции усовершенствования подходов к лечению онкологических заболеваний ведут к тому, что в клиническую практику активно внедряются медицинские ускорители тяжелых заряженных частиц (протонов и ионов), что в свою очередь становится основанием для разработки более точных и надежных устройств для диагностики параметров облучения. Вопрос контроля процесса доставки дозы к опухоли становится особенно актуальным для процедур адронной лучевой терапии, в силу роста ее популярности и сравнительной новизны [1].

При реализации процедур лучевой терапии высокоэнергетическими пучками протонов и ионов необходимы высокоточные системы мониторинга для определения интенсивности, положения и пространственного распределения терапевтического пучка в реальном времени с минимальным возмущением потока частиц. Основная проблема при выборе детектора в адронной лучевой терапии заключается в нелинейной зависимости отклика большинства детектирующих элементов от энергии частиц. Эта проблема сильно ограничивает области применения радиохромных пленок, кремниевых диодов и других доступных твердотельных детекторов, таких как термoluminesцентные дозиметры и алмазные детек-



**Рис. 1.** Условная схема разрабатываемого устройства: 1 – тонкий сцинтилляционный детектор, 2 – устройство на основе кремниевого ФЭУ, 3 – устройство для оцифровки сигнала.

торы, что нельзя сказать про большинство ионизационных камер [2, 3].

В настоящее время для мониторинга медицинских адронных пучков в онлайн-режиме используются плоскопараллельные ионизационные камеры с одним или несколькими электродами [4–8]. Отдельные детекторы на основе ионизационных камер могут измерить положение пучка с субмиллиметровой точностью и погрешностью в определении интенсивности около 1%, что удовлетворяет требованиям к детекторам для адронной терапии [4, 7]. Однако достижение такой точности делает детектор технически очень сложным, что приводит к снижению его надежности и многократному увеличению стоимости.

Другой подход к контролю пространственных характеристик пучков осуществляется с помощью ядерных фотоэмульсий быстрого проявления [9]. Однако такой метод требует дополнительной постобработки и не пригоден для онлайн-мониторинга характеристик пучков ионизирующего излучения.

Помимо этого, при диагностике адронных пучков часто используются сцинтилляционные экраны [10]. Такие детекторы позволяют оценить не только поперечные профили пучка, но и однородность и размер поля облучения [2]. Однако применение подобных систем также носит возмущающий характер.

Как видно из приведенного выше обзора, чем большему количеству требований отвечает метод, тем сложнее его технологическая реализация, что снижает надежность, простоту эксплуатации и повышает стоимость системы детектирования. Как следствие для реализации многофункционального, стабильного и относительно дешевого прибора, необходимо использовать простые, но надежные технологические решения.

В связи с этим становится актуальной задачей разработка детектирующего устройства для регистрации пространственных и энергетических характеристик протонных и ионных пучков. Ранее авторами данной работы был предложен метод многоуглового сканирования пучка ионизирующего излучения, который был успешно апробирован на рентгеновских и электронных пучках [11–13].

Концепция этого метода заключается в математической реконструкции методом интегрального преобразования набора данных, полученных с помощью проволоочного сканирования пучка под разными углами. Наличие устройства, реализующего метод многоуглового сканирования протонных и ионных пучков, позволит сочетать в себе все преимущества вышеописанных подходов. Поиск универсального детектирующего элемента для разрабатываемого устройства позволит регистрировать любые пучки ионизирующего излучения. Таким образом, целью данной работы стала разработка детектирующего устройства, предназначенного для измерения поперечного профиля протонных и ионных пучков.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### 2.1. Метод многоуглового сканирования

В рамках данной работы предлагается разработать устройство, которое позволит реализовать метод многоуглового сканирования. Данный метод ранее был предложен авторами и успешно протестирован на различных источниках ионизирующего излучения [11–13]. Метод многоуглового сканирования пучка заключается в определении пространственного распределения интенсивности пучка в плоскости измерения при помощи реконструкции профилей пучка, полученных методом проволоочного сканирования под разными углами. Для получения таких зависимостей необходима сканирующая детектирующая система, позволяющая получать сигнал, пропорциональный интенсивности излучения, попавшего в рабочее тело детектора.

В связи с этим для решения задач текущего исследования необходимо разработать детектор, который позволит реализовать предложенный подход многоуглового сканирования пучков, для контроля параметров высокоэнергетических пучков протонов и ионов.

### 2.2. Элементы разрабатываемого детектора

Для создания устройства необходимо подобрать узлы детектора и испытать их работоспособность. На рисунке 1 представлена схема разрабатываемого устройства.

После попадания излучения в тонкий сцинтилляционный детектор (№ 1 рис. 1) генерируются световые фотоны, интенсивность которых будет преобразована в сигнал и усилена за счет кремниевого фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) (№ 2 рис. 1). Полученный усиленный сигнал будет обрабатываться устройством для оцифровки сигнала (№ 3 рис. 1).

### 2.3. Сцинтилляционный детектор

Для измерения характеристик медицинских адронных пучков в работе в качестве детектирующего элемента было выбрано тонкое сцинтилляционное оптоволокно (№ 1 рис. 1). Принцип работы сцинтилляционного оптоволокна основывается на генерации световых фотонов под воздействием ионизирующего излучения, которые передаются по оптоволокну многократно преломляясь. К преимуществам использования пластиковых сцинтилляционных детекторов в клинической дозиметрии можно отнести их тканеэквивалентность и высокую чувствительность [14, 15].

На сегодняшний день существует два известных производителя сцинтилляционных оптоволокон: Saint-Gobain Crystals (Нортборо, США) и Kuraray Co., Ltd. (Курасики, Япония). Основными требованиями, предъявляемыми к сцинтиллятору, является способность работать в различных условиях облучения, эффективность, и скорость регистрации не только рентгеновского и фотонного излучений, а также высокоэнергетических электронов, протонов и легких ионов. Данным требованиям отвечает оптоволокно Saint-Gobain Crystals BCF-20 [16], которое было выбрано в качестве рабочего тела детектора. Сцинтилляционное оптоволокно BCF-20 фирмы Saint-Gobain Crystals имеет следующие основные технические параметры: пик – 492 нм, время затухания 2.7 нс, количество регистрируемых фотонов на 1 МэВ – 8000, сечение сцинтилляционного оптоволокна – 1 мм<sup>2</sup>.

### 2.4. Устройство на основе кремниевого ФЭУ

Для усиления и детектирования светового излучения (№ 2 рис. 1), полученного от сцинтилляционного оптоволокна Saint-Gobain Crystals BCF-20 использовался кремниевый фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). В соответствии с параметрами сцинтилляционного материала, описанными выше, было выбрано устройство: PE3315-WB-TIA-TP [17] производителя КЕТЕК (КЕТЕК GmbH, Мюнхен, Германия). Выбранное устройство имеет следующие основные параметры: активная область – 3 × 3 мм<sup>2</sup>, количество детектируемых элементов в активной области ФЭУ – 15, диапазон управляющего напряжения – от 0 В до +1 В, напряжения питания – +5 В.

Для работы выбранного устройства КЕТЕК PE3315-WB-TIA-TP необходим управляющий сигнал, который позволяет усилить сигнал с самого ФЭУ. Максимальное напряжение, подаваемое на устройство, должно составлять 1 В. Уменьшая данное напряжение можно снизить чувствительность устройства при необходимости. Для данных целей использовался компактный источник напряжения собственной разработки.

### 2.5. Устройство для оцифровки сигнала

Следующим узлом детектирующего устройства является преобразователь, с помощью которого сигнал должен оцифровываться и передаваться на персональный компьютер (№ 3 рис. 1) Предполагается, что разрабатываемое детектирующее устройство будет универсально и позволит работать в различных условиях и с различными пучками ионизирующего излучения, поэтому для этих целей в качестве преобразователя было принято решение использовать цифровой программируемый осциллограф с функцией дистанционного управления и передачи данных. Для этого был выбран осциллограф DSO-6104BD [18] фирмы Hantek (Циндао, Китай), который имеет следующие основные характеристики: количество каналов – 4, полоса пропускания – 100 МГц, рабочие режимы – AC/DC/GND, частота дискретизации – 1 ГГц в одноканальном режиме.

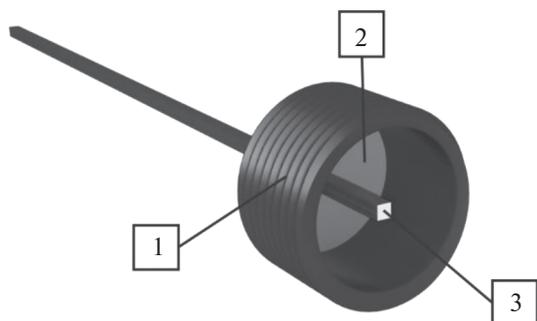
Данная модель осциллографа не имеет монитора и оснащена USB-интерфейсом, позволяющим при помощи персонального компьютера визуализировать и сохранять данные, а также осуществлять полное управление устройством.

### 2.6. Сборка детектирующего устройства

Отдельной задачей стало обеспечение оптического контакта между сцинтилляционным оптоволоком и детектирующими элементами активной области ФЭУ. Детектирующие элементы выбранного устройства на основе ФЭУ были размещены в углублении корпуса, имеющем внутреннюю резьбу, в котором предполагается размещение сцинтиллятора. Специально для этого была разработана соединительная деталь с внешней резьбой соответствующей внутренней резьбе углубления и с коаксиальным отверстием в центре (рис. 2).

Данная деталь была изготовлена из высокопрочного пластика PETG [19] (полиэтилентерефталат гликоль) с помощью устройства трехмерной печати [20] методом послойного наплавления. В отверстие детали с помощью эпоксидной смолы фиксировалось сцинтилляционное оптоволокно. Далее поверхность изделия с торцом сцинтиллятора, соприкасающаяся с активной областью кремниевого ФЭУ, была зашлифована и отполирована, во избежание потерь фотонов, сгенерированных в теле детектора.

Изделие с закрепленным сцинтилляционным оптоволоком устанавливалось во внутреннюю резьбу устройства КЕТЕК PE3315-WB-TIA-TP, которое последовательно соединялось с осциллографом Hantek DSO-6104BD. Таким образом, было собрано детектирующее устройство для регистрации интенсивности ионных и протонных пучков в поперечном сечении пучка.



**Рис. 2.** Трехмерная модель изделия со сцинтилляционным оптоволокном, которая соприкасается с активной областью кремниевого ФЭУ: 1 – пластиковая соединительная деталь, 2 – эпоксидная смола, 3 – торец сцинтилляционного оптоволокна.

### 2.7. Система позиционирования детектора

Для обеспечения поступательного перемещения собранного детектора был использован линейный транслятор 8MT50-200 – Motorized Translation Stages фирмы Standa [21] (Standa Ltd, Вильнюс, Литва). Выбранный линейный транслятор имеет следующие основные характеристики: диапазон перемещения – 200 мм, точность позиционирования – 5 мкм, вес – 1.65 кг, максимальная нагрузка горизонтальная – 30 кг, максимальная нагрузка вертикальная – 8 кг.

### 2.8. Пленочный детектор

Для определения пространственных характеристик адронных пучков могут быть применены радиохромные пленки [22], которые в данной работе были выбраны в качестве стандартного общепринятого подхода для оценки работоспособности разработанного детектора.

В работе были выбраны радиохромные пленки Gafchromic EBТ3 (Ashland Inc., Ковингтон, США) [23],

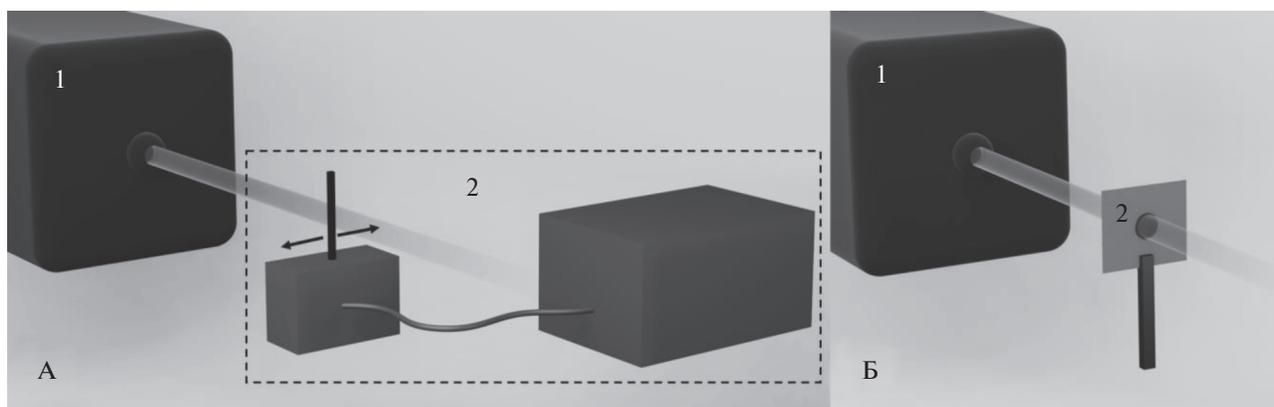
используемые как стандартный коммерчески доступный детектор для регистрации пространственного распределения пучка ионизирующего излучения. Принцип работы пленочного детектора основан на полимеризации радиационно-чувствительных мономеров активного слоя пленки под воздействием ионизирующего излучения и ее дальнейшем потемнении пропорционально поглощенной дозе [24, 25].

Пленочный детектор в ходе проведения экспериментов устанавливался на том же расстоянии от выходного окна источника излучения, где находилось рабочее тело разрабатываемого детектора. Далее облученные пленки оцифровывались на планшетном сканере Epson Perfection V850 Pro [26] (Seiko Epson Corporation, Сува, Япония), полученные цифровые изображения обрабатывались с использованием специального программного кода, разработанного с помощью пакета прикладных программ MATLAB [27] (The MathWorks, Натик, США).

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В работе были проведены экспериментальные исследования разработанного детектора для реализации метода многоугольного сканирования. В экспериментах в качестве источника излучения использовался протонный пучок синхротрона “Прометеус” (г. Протвино, Россия), и пучок ионов углерода радиобиологического стенда ускорительного комплекса У-70 (г. Протвино, Россия). Условная схема проведения эксперимента для случая применения разработанного детектора и пленочного детектора показана на рисунке 3.

На начальном этапе по апробации предложенного детектора в эксперименте на ускорителе “Прометеус” был получен горизонтальный профиль протонного пучка. Энергия протонного



**Рис. 3.** Условная схема проведения эксперимента: А) для разработанного детектора и Б) пленочного детектора: 1 – источник излучения, 2 – детектор.

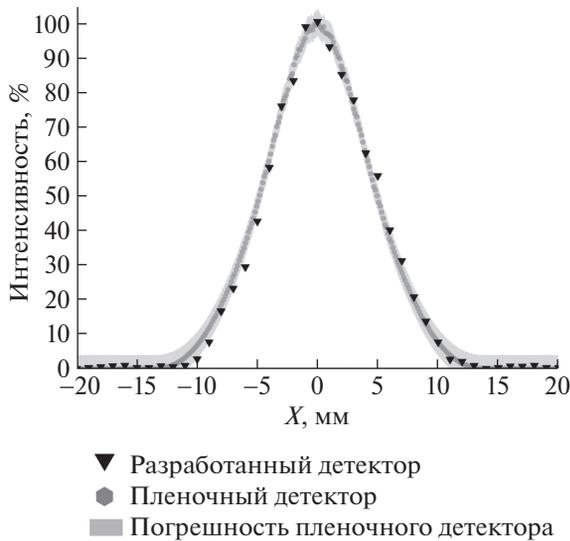


Рис. 4. Горизонтальный профиль протонного пучка.

пучка составила 100 МэВ, среднее количество протонов в сбросе —  $4.5 \times 10^8$ , длительность сброса — 550 мс. Сцинтилляционное оптоволокно поступательно смещалось в плоскости перпендикулярной оси пучка на расстояние 40 мм с шагом — 1 мм.

Результаты сравнения горизонтальных профилей протонного пучка, полученных с помощью пленки и разработанного детектора, представлены на рисунке 4. В каждом измерении данные нормировались на максимальное значение.

Принимая во внимание ограничения возможности применения пленочных детекторов [22] для регистрации пространственных характеристик адронных пучков измерения проводились в области плато глубинного распределения.

Из рис. 4 видно, что разработанный макет детектирующего устройства пригоден для измерения интенсивности протонов в поперечном сечении пучка.

Далее были проведены эксперименты на пучке ионов углерода  $^{12}\text{C}^{6+}$  радиобиологического стенда ускорительного комплекса У-70. В результате экспериментальной апробации детектора были получены горизонтальные профили ионного пучка. Энергия углеродного пучка составила 300 МэВ/нуклон и 400 МэВ/нуклон, длительность сброса 0.6 с, среднее количество ядер углерода за сброс до  $1.4 \times 10^9$ . Сцинтилляционное оптоволокно поступательно смещалось в плоскости перпендикулярной оси пучка на расстояние 60 мм с шагом 4 мм.

Результаты измерения представлены на рисунке 5. В каждом измерении данные нормировались на максимальное значение.

Из рис. 5 видно, что разработанный детектор пригоден для измерения интенсивности высокоэнергетических углеродных пучков в поперечном сечении пучка. В сравнении с пленочным детектором характер полученных профилей совпадает в пределах погрешности.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено исследование, направленное на разработку универсального детектирующего устройства, способного регистрировать распределение интенсивности излучения пучков ионов и протонов в поперечном сечении. Для этого был разработан и апробирован детектор, рабочим телом которого стало сцинтилляционное оптоволокно, пригодное для регистрации разных пучков ионизирующего излучения. Предложенный детектор был апробирован на протонном пучке синхротрона “Прометеус” и

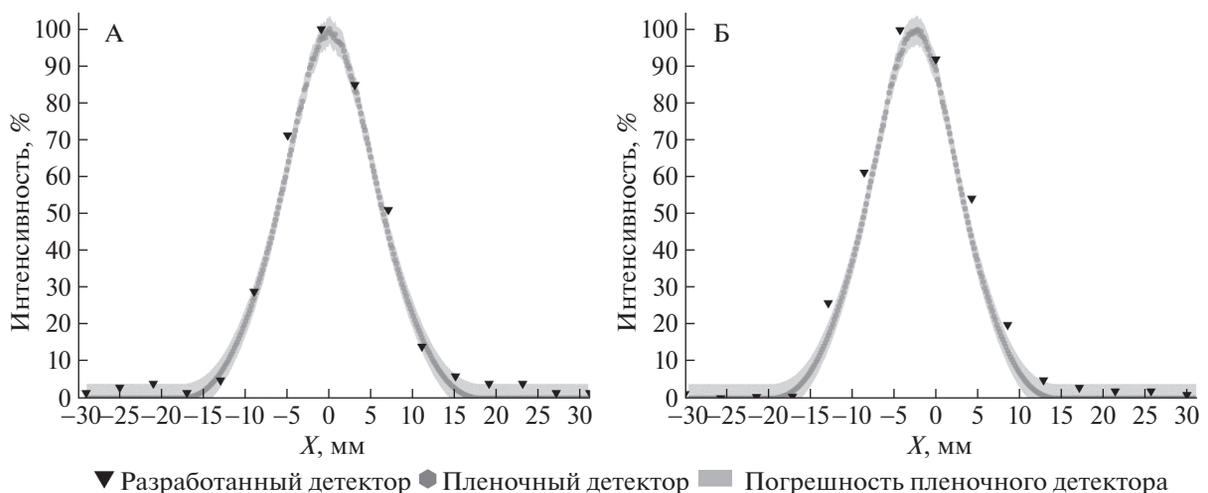


Рис. 5. Горизонтальные профили пучка углерода для энергий: А — 300 МэВ/нуклон, Б — 400 МэВ/нуклон.

на пучке ионов углерода радиобиологического стенда ускорительного комплекса У-70. Полученные результаты показали пригодность разработанного детектора для измерения распределения интенсивности высокоэнергетических протонных и углеродных пучков в поперечном сечении пучка.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2022-620 (проект № МК-26.2022.1.2).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Particle therapy facilities in clinical operation. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ptcog.ch/index.php/facilities-in-operation>. (дата обращения: 25.07.2022 г.)
2. Karger C.P., Jäkel O., Palman H., Kanai T. Dosimetry for ion beam radiotherapy // *Physics in Medicine & Biology*, 2010. V. 55. № 21. P. R193.
3. Castriconi R., Ciocca M., Mirandola A., Sini C., Broggi S., Schwarz M., Russo P. Dose-response of EBТ3 radiochromic films to proton and carbon ion clinical beams // *Physics in Medicine & Biology*, 2016. V. 62. № 2. P. 377.
4. Actis O., Meer D., König S. Precise on-line position measurement for particle therapy // *Journal of Instrumentation*, 2014. V. 9. № 12. P. C12037.
5. Xu Z., Mao R., Duan L., She Q., Hu Z., Li H., Zhang J. A new multi-strip ionization chamber used as online beam monitor for heavy ion therapy // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013. V. 729. P. 895–899.
6. Basile E., Carloni A., Castelluccio D.M., Cisbani E., Collilli S., De Angelis G., Vacca G. An online proton beam monitor for cancer therapy based on ionization chambers with micro pattern readout // *Journal of Instrumentation*, 2012. V. 7. № 03. P. C03020.
7. Giordanengo S., Donetti M., Garella M.A., Marchetto F., Alampi G., Ansarinejad A., Cirio R. Design and characterization of the beam monitor detectors of the Italian National Center of Oncological Hadron-therapy (CNAO) // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013. V. 698. P. 202–207.
8. Васильев С.Е., Вишневский А.В., Кадыков М.Г., Маканькин А.М., Тютюников С.И., Шурыгин А.А. Разработка системы мониторинга формы, положения и интенсивности выведенного пучка релятивистских ионов ускорительного комплекса Нуклотрон-М ОИЯИ // *Письма в ЭЧАЯ*. 2014. Т. 11. № 6. С. 190.
9. Балдин А.А., Берлев А.И., Васильев С.Е., Вишневский А.В., Владимирова Н.М., Кудашкин И.В., Тютюникова С.И. Мониторирование выведенных пучков ускорительного комплекса нуклотрон для экспериментов “Энергия + трансмутация” II // *Письма в ЭЧАЯ*. 2015. Т. 13. С. 334–344.
10. Furukawa T., Saotome N., Inaniwa T., Sato S., Noda K., Kanai T. Delivery verification using 3D dose reconstruction based on fluorescence measurement in a carbon beam scanning irradiation system // *Medical physics*, 2008. V. 35. № 6. Part 1. P. 2235–2242.
11. Bulavskaya A.A., Cherepennikov Y.M., Chakhlov S.V., Grigorieva A.A., Miloichikova I.A., Vukolov A.V., Stuchebrov S.G. Measurement of electron beam transverse flux density distribution // *IOP Conference: Series Materials Science and Engineering, 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019)*, Tomsk, 2021. V. 1019. № 1. P. 012043.
12. Булавская А.А. Разработка и применение метода многоугольного сканирования для регистрации пространственного энергетического распределения ионизирующего излучения в поперечном сечении пучка. Дисс. канд. физ.-мат. наук. Томск, 2020. 118 с.
13. Bulavskaya A.A., Cherepennikov Y.M., Grigorieva A.A., Miloichikova I.A., Stuchebrov S.G. Multiangle scanning for measuring radiation beam profiles with a typical size of 10 millimetres – Proof-of-principle experiments // *Journal of Instrumentation*, 2022. V. 17. № 07. P. T07004.
14. Beaulieu L., Goulet M., Archambault L., Beddar S. Current status of scintillation dosimetry for megavoltage beams // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2013. V. 444. № 1. P. 012013.
15. Guillot M., Gingras L., Archambault L., Beddar S., Beaulieu L. Spectral method for the correction of the Cerenkov light effect in plastic scintillation detectors: a comparison study of calibration procedures and validation in Cerenkov light dominated situations // *Medical physics*, 2011. V. 38. № 4. P. 2140–2150.
16. Saint-Gobain Crystals BCF-20. [Электронный ресурс]. <https://www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators/fibers> (дата обращения: 25.07.2022 г.)
17. Silicon Photomultiplier Module PE3315-WB-TIA-TP. [Электронный ресурс]. <https://www.ketek.net/wp-content/uploads/KETEK-PE3315-WB-TIA-TP.pdf> (дата обращения: 25.07.2022 г.)
18. USB осциллограф DSO-6104BD. [Электронный ресурс]. <https://www.hantek.ru/products/dso6104bd.html> (дата обращения: 25.07.2022 г.)
19. Натуральный PETG пластик Bestfilament для 3D-принтеров 0.5 кг (1.75 мм). [Электронный ресурс]. <https://bestfilament.ru/petg-plastik-bestfilament-dlya-3d-printerov-1-kg-175-mm/> (дата обращения: 25.07.2022 г.)
20. Original Prusa i3 mk3s. [Электронный ресурс]. <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-i3-mk3s/> (дата обращения: 25.07.2022 г.)
21. Standa 8MT50-200 Motorized Translation Stages. [Электронный ресурс]. [https://www.standa.lt/products/catalog/motorised\\_positioners?item=308](https://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=308) (дата обращения: 25.07.2022 г.)
22. Battaglia M.C., Espino J.M., Gallardo M.I., Lallena A.M., Fernandez B., Cortés-Giraldo M.A., Schardt D. EBТ3 film calibration in the Bragg peak region for proton

- beams below 5 MeV // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2019. V. 444. P. 117–124.
23. El Barouky J., Fournier-Bidoz N., Mazal A., Fares G., Rosenwald J. C. Practical use of Gafchromic EBT films in electron beams for in-phantom dose distribution measurements and monitor units verification // *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*, 2011. V. 27. № 2. P. 81–88.
24. Mathot M., Sobczak S., Hoornaert M.T. GafChromic film dosimetry: four years experience using FilmQA Pro software and Epson flatbed scanners // *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*, 2014. V. 30. № 8. P. 871–877.
25. Devic S., Seuntjens J., Sham E., Podgorsak E.B., Schmidlein C.R., Kirov A.S., Soares C.G. Precise radiochromic film dosimetry using a flatbed document scanner // *Medical physics*. 2005. V. 32. № 7. Part 1. P. 2245–2253.
26. Epson Perfection V850 Pro. [Электронный ресурс]. <https://epson.ru/catalog/scanners/epson-perfection-v850-pro/> (дата обращения: 25.07.2022 г.)
27. MATLAB. [Электронный ресурс]. <https://www.math-works.com/products/matlab.html> (дата обращения: 25.07.2022 г.)

---

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI", 2022, vol. 11, no. 2, pp. 170–177

---

## Development of a Device for the Transverse Profile Measurement of Hadron Beams

A. A. Grigorieva<sup>a,#</sup>, A. A. Bulavskaya<sup>a</sup>, E. A. Bushmina<sup>a</sup>, I. A. Miloichikova<sup>a,b</sup>, and S. G. Stuchebrov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia

<sup>b</sup> Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634009 Russia

<sup>#</sup>e-mail: agrigorieva@tpu.ru

Received August 1, 2022; revised August 6, 2022; accepted August 9, 2022

**Abstract**—The clinical application of medical proton and ion accelerators requires more accurate and reliable devices for diagnostics of radiation parameters. For the radiotherapy procedures by high-energy beams of heavy charged particles, high-precision monitoring systems are needed to determine the intensity, position, and spatial distribution of the therapeutic beam in real time with minimum particle flux disturbance. Existing measuring systems do not meet all the necessary requirements. In this connection, it becomes relevant to develop a detecting device for recording the spatial and energy characteristics of proton and ion beams. In this work, the detecting device is developed to measure the transverse distribution of the intensity of hadron beams. The developed detector should allow the implementation of the multi-angle scanning method, which was proposed in our previous works and was successfully tested on X-ray and electron beams. As a result, a scheme of the developed detector has been proposed and the corresponding detecting device has been assembled. The device working medium is a thin scintillation fiber suitable for detecting high-energy hadron beams. The developed detector has been tested on proton and carbon ion beams. The horizontal profiles of the proton and ion beams for different energies measured using the developed and film detectors have been compared. As a result, it has been shown that the developed detector is suitable for measuring the transverse intensity distribution of high-energy proton and ion beams.

**Keywords:** beam diagnostics, detector, transverse profile, multi-angle scanning, scintillation fiber, medical beam, proton beam therapy, ion beam therapy

DOI: 10.56304/S2304487X22020043

### REFERENCES

1. *Particle therapy facilities in clinical operation*. Available at: <https://www.ptcog.ch/index.php/facilities-in-operation>. (accessed 25.07.2022)
2. Karger C.P., Jäkel O., Palman, H., Kanai T. Dosimetry for ion beam radiotherapy. *Physics in Medicine & Biology*, 2010, vol. 55, no. 21, p. R193.
3. Castriconi R., Ciocca M., Mirandola A., Sini C., Broggi S., Schwarz M., Russo P. Dose-response of EBT3 radiochromic films to proton and carbon ion clinical beams. *Physics in Medicine & Biology*, 2016. vol. 62, no. 2, p. 377.
4. Actis O., Meer D., König S. Precise on-line position measurement for particle therapy. *Journal of Instrumentation*, 2014, vol. 9, no. 12, p. C12037.
5. Xu Z., Mao R., Duan L., She Q., Hu Z., Li H., Zhang J. A new multi-strip ionization chamber used as online beam monitor for heavy ion therapy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, vol. 729, pp. 895–899.

6. Basile E., Carloni A., Castelluccio D.M., Cisbani E., Colilli S., De Angelis G., Vacca G. An online proton beam monitor for cancer therapy based on ionization chambers with micro pattern readout. *Journal of Instrumentation*, 2012, vol. 7. no. 03, pp. C03020.
7. Giordanengo S., Donetti M., Garella M.A., Marchetto F., Alampi G., Ansarinejad A., Cirio R. Design and characterization of the beam monitor detectors of the Italian National Center of Oncological Hadrontherapy (CNAO). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, vol. 698, pp. 202–207.
8. Vasil'ev S.E., Vishnevskij A.V., Kadykov M.G., Makan'kin A.M., Tyutyunnikov S.I., Shurygin A.A. Razrabotka sistemy monitorirovaniya formy, polozheniya i intensivnosti vyvedennogo puchka relyativistskih ionov uskoritel'nogo kompleksa Nuklotron-M OIYAI [Development of a monitoring system for the shape, position and intensity of the extracted beam of relativistic ions of the accelerator complex Nuclotron-M JINR]. *Pis'ma v ECHAYA*, 2014, vol. 11, no. 6, p. 190. (In Russian)
9. Baldin A.A., Berlev A.I., Vasil'ev S.E., Vishnevskij A.V., Vladimirova H.M., Kudashkin I.V., Tyutyunnikova S.I. Monitorirovanie vyvedennyh puchkov uskoritel'nogo kompleksa nuklotron dlya eksperimentov "Energiya + transmutaciya" [Monitoring of the extracted beams of the Nuclotron accelerator complex for the "Energy + transmutation" experiments]. II. *Pis'ma v ECHAYA*, 2015, vol. 13, pp. 334–344. (In Russian)
10. Furukawa T., Saotome N., Inaniwa T., Sato S., Noda K., Kanai T. Delivery verification using 3D dose reconstruction based on fluorescence measurement in a carbon beam scanning irradiation system. *Medical physics*, 2008, vol. 35, no. 6, Part1, pp. 2235–2242.
11. Bulavskaya A.A., Cherepennikov Y.M., Chakhlov S.V., Grigorieva A.A., Miloichikova I.A., Vukolov A.V., Stuchebrov S.G. Measurement of electron beam transverse flux density distribution. *IOP Conference: Series Materials Science and Engineering, 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019)*, Tomsk, 2021, vol. 1019, no. 1, pp. 012043.
12. Bulavskaya A.A. *Razrabotka i primeneniye metoda mnogouglovnogo skanirovaniya dlya registracii prostranstvennogo energeticheskogo raspredeleniya ioniziruyushchego izlucheniya v poperechnom sechenii puchka*. Diss. kand. fiz. mat. nauk. [Development and application of the multi-angle scanning method for recording the spatial energy distribution of ionizing radiation in the beam cross section. Diss. Cand. of Phys.-Math. Sciences]. Tomsk, 2020. 118 p.
13. Bulavskaya A.A., Cherepennikov Y.M., Grigorieva A.A., Miloichikova I.A., Stuchebrov S.G. Multiangle scanning for measuring radiation beam profiles with a typical size of 10 millimetres – Proof-of-principle experiments. *Journal of Instrumentation*, 2022, vol. 17, no. 07, pp. T07004.
14. Beaulieu L., Goulet M., Archambault L., Beddar S. Current status of scintillation dosimetry for megavoltage beams. *Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing*, 2013, vol. 444, no. 1, p. 012013.
15. Guillot M., Gingras L., Archambault L., Beddar S., Beaulieu L. Spectral method for the correction of the Cerenkov light effect in plastic scintillation detectors: a comparison study of calibration procedures and validation in Cerenkov light dominated situations. *Medical physics*, 2011, vol. 38, no. 4, pp. 2140–2150.
16. *Saint-Gobain Crystals BCF-20*. Available at: <https://www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators/fibers> (accessed 25.07.2022)
17. *Silicon Photomultiplier Module PE3315-WB-TIA-TP*. Available at: <https://www.ketek.net/wp-content/uploads/KETEK-PE3315-WB-TIA-TP.pdf> (accessed 25.07.2022)
18. *USB oscillograf DSO-6104BD USB oscilloscope DSO-6104BD*. Available at: <https://www.hantek.ru/products/dso6104bd.html> (accessed 25.07.2022)
19. *Natural'nyj PETG plastik Bestfilament dlya 3D-printerov 0.5 kg (1,75 mm) (1,75 мм)* [Natural PETG plastic Bestfilament for 3D printers 0.5 kg (1.75 mm)]. Available at: <https://bestfilament.ru/petg-plastik-bestfilament-dlya-3d-printerov-1-kg-175-mm/>
20. *Original Prusa i3 mk3s*. Available at: <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-i3-mk3s/> (accessed 25.07.2022)
21. *Standa 8MT50-200 Motorized Translation Stages*. Available at: [https://www.standa.lt/products/catalog/motorised\\_positioners?item=308](https://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=308) (accessed 25.07.2022)
22. Battaglia M.C., Espino J.M., Gallardo M.I., Lallena A.M., Fernandez B., Cortés-Giraldo M.A., Schardt D. EBT3 film calibration in the Bragg peak region for proton beams below 5 MeV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2019, vol. 444, pp. 117–124.
23. El Barouky J., Fournier-Bidoz N., Mazal A., Fares G., Rosenwald J. C. Practical use of Gafchromic EBT films in electron beams for in-phantom dose distribution measurements and monitor units verification. *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*, 2011, vol. 27, no. 2, pp. 81–88.
24. Mathot M., Sobczak S., Hoornaert M.T. GafChromic film dosimetry: four years experience using FilmQA Pro software and Epson flatbed scanners. *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*, 2014, vol. 30, no. 8, pp. 871–877.
25. Devic S., Seuntjens J., Sham E., Podgorsak E.B., Schmidtlein C.R., Kirov A.S., Soares C.G. Precise radiochromic film dosimetry using a flatbed document scanner. *Medical physics*, 2005, vol. 32, no. 7, Part 1, pp. 2245–2253.
26. *Epson Perfection V850 Pro*. Available at: <https://epson.ru/catalog/scanners/epson-perfection-v850-pro/> (accessed: 25.07.2022 г.)
27. *MATLAB*. Available at: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed: 25.07.2022 г.)