

*Е. А. Кузнецова<sup>1\*</sup>, А. Н. Фионов<sup>1,2</sup>*

## **Технические вопросы построения сцинтилляционного экрана**

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: elizaveta.kuznetsova04@mail.ru

**Аннотация.** Для проведения диагностики пучка используются сцинтилляционные датчики (люминофоры). Люминофоры уже более ста лет служат средством диагностики ионизирующего излучения. Были рассмотрены основные свойства люминофоров и определен наиболее оптимальный люминофор для диагностики – им является Chomax. Данная диагностика проводится для создания синхротронного испытательного комплекса. Синхротронный комплекс испытательный предназначен для генерации интенсивных протонных и ионных пучков, и их транспортировки к облучательным портам. Целью данной статьи является расчет параметров потерь от одного типа частиц к другим. Расчет параметров проводится с помощью формулы Бете-Блоха. По итогам статьи было определено соотношение для дальнейшей диагностики пучков ионов.

**Ключевые слова:** люминофор, пучки ионов, сцинтилляционный экран

*Е. А. Kuznetsova<sup>1\*</sup>, А. N. Fionov<sup>1,2</sup>*

## **Technical Aspects of Building a Scintillation Screen**

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk,  
Russian Federation

\* e-mail: elizaveta.kuznetsova04@mail.ru

**Abstract.** Scintillation sensors (phosphors) are used to diagnose the beam. Phosphors have been used as a diagnostic tool for ionizing radiation for more than a hundred years. Earlier, the main properties of phosphors were considered and the most optimal phosphor for diagnostics was determined – it is Chomax. This diagnosis is carried out to create a synchrotron test complex. The synchrotron test complex is designed to generate intense proton and ion beams and transport them to irradiation ports. The purpose of this work is to calculate the parameters of losses from one type of particle to another. The parameters will be calculated using the Bethe-Bloch formula. Based on the results of the work, the ratio for further diagnosis was determined.

**Keywords:** luminophore, ion beams, scintillation screen

### ***Введение***

Люминофоры уже более ста лет служат средством диагностики ионизирующего излучения. Люминофорами называются химические вещества в виде пигментов или порошков, преобразующие лучистую энергию, которую они поглощают, в световое излучение [1]. Производство люминофоров строится, в основ-

ном, на базе цинка – это его сульфиды и сульфаты, а также на базе алюминия — это алюминаты редкоземельных металлов [2]. Сцинтилляционный экран - это устройство для регистрации и измерения энергии ионизирующих излучений, таких как гамма-лучи, рентгеновские лучи и частицы высокой энергии. Он состоит из сцинтиллятора - материала, который при взаимодействии с частицами или фотонами выделяет световые фотоны или электроны, также называемые "сцинтилляциями" [3]. Были рассмотрены основные свойства люминофоров и определен наиболее оптимальный люминофор для диагностики – им является Chomax. Данная диагностика проводится для создания синхротронного испытательного комплекса [4]. Синхротронный комплекс испытательный (СКИ) предназначен для генерации интенсивных протонных и ионных пучков, и их транспортировки к облучательным портам (ОП).

### **Методы и материалы**

Существуют специфичные средства диагностики пучка, но в данном случае будет использоваться сцинтилляционный датчик, либо просто люминофор. Выглядит он следующим образом: имеется поперечное сечение камеры и в определённом месте имеется сильфон (вакуумно-плотная трубка, которая имеет свойство сжиматься и разжиматься) и имеется экран на который нанесен сцинтилляционный материал, и есть привод, который вводит ионы в камеру, и пучок, попадая в экран, теряет часть энергии, что приводит к высвобождению этой энергии в виде светового излучения [5]. Потери энергии описываются по формуле Бете - Блоха. Формула Бете – Блоха – формула для удельной ионизационной потери энергии при прохождении заряженных частиц через вещество.

Удельная потеря энергии  $\frac{dE}{dx}$  описывается формулой:

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi E_e r_e^2 \frac{n_e Z_0^2}{\beta^2} \left( \frac{1}{2} \ln \frac{2E_e \gamma^2 \beta^2 E_{\max}}{I^2} - \beta^2 \right), \quad (1)$$

где  $E_e = m_e c^2 \approx 0,51$  МэВ – энергия покоя электрона;  $n_e = \frac{\rho N_A Z}{A}$  – плотность электронов в веществе ( $N_A$  – число Авогадро,  $Z$  – атомный номер,  $A$  – атомная масса,  $\rho$  – плотность);  $Z_0$  – заряд частиц пучка в единицах заряда протона;  $r_e = 2,818 \cdot 10^{-15}$  м – классический радиус электрона;  $\beta = \frac{v}{c}$  и  $\gamma = \frac{1}{1 - \beta^2}$  – релятивистские параметры частиц пучка;  $I \approx 13,5 \cdot Z$  эВ — средний потенциал ионизации вещества.  $E_{\max}$  – максимальная энергия, которую может передать частица пучка электрону вещества, показанная в формуле:

$$E_{\max} = \frac{2E_e \beta^2 E^2}{E_0^2 + E_e^2 + 2E_e E}, \quad (2)$$

где  $E_0$  – энергия покоя и  $E = \gamma E_0$ ,  $E$  – полная энергия частиц пучка. Для тяжелых частиц (протонов и ионов)  $E_{max} = 2E_e \beta^2 \gamma^2$ , для ультрарелятивистских электронов и позитронов ( $\gamma \gg 1$ ,  $\beta = 1$ )  $E_{max} = \gamma E_e = E$ .

Формула Бете-Блоха была выведена для тяжелых частиц – протонов и ионов [6]. Для легких частиц – электронов и позитронов – формула расчета удельной потери энергии на ионизацию, встречающаяся в литературе, содержит дополнительные члены:

$$\frac{dE}{dx} = 2\pi E_e r_e^2 \frac{n_e}{\beta^2} \left[ \ln \frac{(\gamma-1)E_e^2 \beta^2 \gamma^2}{2I^2} - \left( \frac{2}{\gamma} - 1 + \beta^2 \right) \ln 2 + \frac{1}{\gamma^2} + \frac{1}{8} \left( 1 - \frac{1}{\gamma} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

У СКИ есть набор элементов, которые она производит и диагностику которых надо выполнять. Основной вопрос – это радиационная стойкость веществ. В Институте ядерной физики СО РАН имеется протонный ускоритель Тандем-БНЗТ (Тандем-БНЗТ), на котором будет проводиться испытание радиационной стойкости Chomax [7].

Проблема в том, что на СКИ используются тяжелые ионы, а на Тандем – БНЗТ протоны, и необходимо посчитать параметры потерь от одного типа частиц к другим. Нужно взять из частиц ионов ту, которая вносит больше всего радиационных потерь в люминофор, и самую тяжелую (большой заряд и маленькая скорость) [8].

### Результаты

Используя формулу Бета-Блоха (формула (1)) проанализировали и посчитали в каком соотношении находится доза, потерянная протонами на 2 мэВ пучке Тандем - БНЗТ и те параметры пучка, которые есть у СКИ ПЗ [9]. Исходя из формулы (1) получаем выражение:

$$-\frac{dT}{dx} \sim A \frac{z^2}{\gamma^2} N, \quad (4)$$

при условии  $\gamma \uparrow$ ,  $\frac{dT}{dx} \downarrow$ ;  $z \uparrow$ ,  $\frac{dT}{dx} \uparrow$ . (табл. 1).

Таблица 1

Сводная характеристика

Частицы	Z	N	$\gamma, (N_e V)$	$\frac{dT}{dx}$
Bi	-50	$10^8$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$AN_1 \frac{2500}{12 \cdot 25 \cdot 10^{-6}} = 200 AN_1 \cdot 10^{-6}$
P	-1	$10^{11}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$AN_2 \frac{1}{56 \cdot 25} 10^6 = 0,018 AN_2 \cdot 10^6$

Частицы	Z	N	$\gamma, (N_e V)$	$\frac{dT}{dx}$
Ag	-25	$10^8$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$AN_3 \frac{625}{12 \cdot 25} 10^6 = 50 AN_3 \cdot 10^6$
P <sub>бнзт</sub>	-1	$N_0$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$AN_0 \frac{1}{9 \cdot 24} 10^6 = 0,3 AN_0 \cdot 10^6$

$$Ag: \frac{N_3}{N_0} \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{0,3 \cdot 10^6} = 1 \rightarrow N_0 = N_3 \cdot 324 \cdot 50 = 1,5 \cdot 10^{10},$$

$$Bi: \frac{N_1}{N_0} \cdot \frac{200 \cdot 10^6}{0,3 \cdot 10^6} = 1 \rightarrow N_0 = N_1 \cdot 3 \cdot 24 \cdot 200 = 6 \cdot 10^{10},$$

$$p: \frac{N_2}{N_0} \cdot \frac{0,018 \cdot 10^6}{0,3 \cdot 10^6} = 1 \rightarrow N_0 = N_2 \frac{3 \cdot 24}{56,25} = 5,78 \cdot 10^9,$$

$$Ag: \frac{N_3}{N_0} \cdot \frac{50 \cdot 10^6}{0,3 \cdot 10^6} = 1 \rightarrow N_0 = N_3 \cdot 324 \cdot 50 = 1,5 \cdot 10^{10}.$$

Если  $N_0 = 10^{12}$ , то один выстрел ионов у Bi равен 17 выстрелам протонов, у p равен 170 выстрелам протонов, у Ag равен 50 выстрелам протонов. Зная параметры пучка ионов, вычислили соотношения для протонов [10].

### *Заключение*

В данной статье были рассчитаны соотношения ионов к протонам для дальнейшего проведения испытаний для диагностики пучков, необходимых для разработки СКИ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борн, М.Э. Основы оптики / М.Э. Борн. – Москва: Наука, 1973. – 215 с.
2. Булина, Н. А. Детонационное напыление гидроксиапатита на имплантат из титанового сплава / Н. А. Булина. – Москва: Материалы, 2021. – 169 с.
3. Бутслов, М.М. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях / М.М. Бутслов. – Москва: Наука, 1978. – 225 с.
4. Бутслов, М. М. Электрофоретические люминесцентные экраны для ЭОП / М. М. Бутслов. — Москва: Наука, 1976. - 231 с.
5. Глобус, М. Е. Неорганические сцинтилляторы / М. Е. Глобус. – Харьков: Акта, 2000. – 174 с.
6. Казянкин, О. Н. Неорганические люминофоры / О. Н. Казянкин. – Москва: Химия, 1975. – 246 с.
7. Калашникова, В. И. Сцинтилляционные счетчики / В. И. Калашникова. – Москва: Наука, 1966. – 279 с.
8. Михайлов, М.М. Термостабилизирующие покрытия ВаTiO<sub>3</sub>, синтезированные методом детонационного напыления, Технология поверхностей и покрытий / М.М. Михайлов. – Москва, 2017. – 192 с.
9. Пустоваров, В.Д. Люминесценция твердых тел / В. Д. Пустоваров. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2017. — 272 с.
10. Соболева, Н. А. Фотоэлектронные приборы / Н. А. Соболева. – Москва: Высшая школа, 1974. – 219 с.

© Е. А. Кузнецова, А. Н. Фионов, 2023