

P1-2017-59

Б. Ж. Залиханов *

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ
 γ -КВАНТОВ ГАЗОНАПОЛНЕННЫМИ
КООРДИНАТНЫМИ КАМЕРАМИ**

Направлено в журнал «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A»

* E-mail: zalikhanov@jinr.ru

Залиханов Б. Ж.

P1-2017-59

Повышение эффективности регистрации γ -квантов газонаполненными координатными камерами

Для эффективной регистрации рентгеновского излучения пропорциональными и дрейфовыми камерами предлагается новое положение конверторов в рабочем объеме камер. Положение и геометрические параметры конверторов полностью удовлетворяют кинематике фотоэлектрического поглощения γ -квантов атомами вещества. Предварительная экспериментальная проверка подтвердила возможность значительного повышения эффективности регистрации газонаполненными детекторами γ -излучения.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2017

Zalikhanov B. Zh.

P1-2017-59

Improvement of Gamma-Detector of Gas-Filled Coordinate Chambers

A new arrangement of converters in the working volume of proportional and drift chambers is proposed for effective detection of X-rays. Positions and geometrical parameters of the converters entirely agree with kinematics of photoelectric absorption of gamma-rays by atoms. The preliminary experimental test confirms the possibility of significantly increasing the gamma detection efficiency of gas-filled detectors.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение газонаполненных координатных детекторов (пропорциональных и дрейфовых камер) связано в первую очередь с их исключительно высокими регистрационными свойствами, такими как временное и пространственное разрешение, высокая скорость счета, малое количество вещества на пути регистрируемых частиц. Кроме того, на их основе возможно создание детекторов с большой чувствительной площадью. Эти качества новых детекторов ядерного излучения с момента их появления привлекали к себе большое внимание. Их применение в исследованиях, проводимых с помощью рентгеновского излучения в радиобиологии, медицине, радиационной химии и физике, способствовало бы получению новых знаний. Однако низкая эффективность регистрации газонаполненных координатных детекторов в области рентгеновского излучения сильно ограничила круг проводимых исследований. Для устранения этого недостатка были приложены большие усилия. Попытки использования рыхлых наполнителей, пропитанных солями тяжелых металлов, или коллиматоров-конверторов, расположенных в газовом объеме детекторов, давали незначительный эффект. Практически такой же результат получался и в сборке камер с отдельными плоскими конверторами-катодами. К сожалению, все эти усилия не увенчались успехом. Интерес к данной проблеме и стремление к получению количественных и качественных значений для свойств исследуемого объекта с использованием газонаполненных координатных детекторов постепенно ослабли.

1. РАННИЕ РАЗРАБОТКИ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ КООРДИНАТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Низкое поглощение рентгеновского излучения и аннигиляционных γ -квантов в газе пропорциональных и дрейфовых камер, выполняющем роль чувствительной среды, приводило к тому, что эффективность регистрации не превышала нескольких процентов в диапазоне значений энергии регистрируемых квантов 50–511 кэВ.

Решить эту проблему надеялись с помощью твердых конверторов, расположенных в чувствительном объеме детектора. Предполагалось, что наличие более плотного вещества увеличит число взаимодействий квантов, а обра-

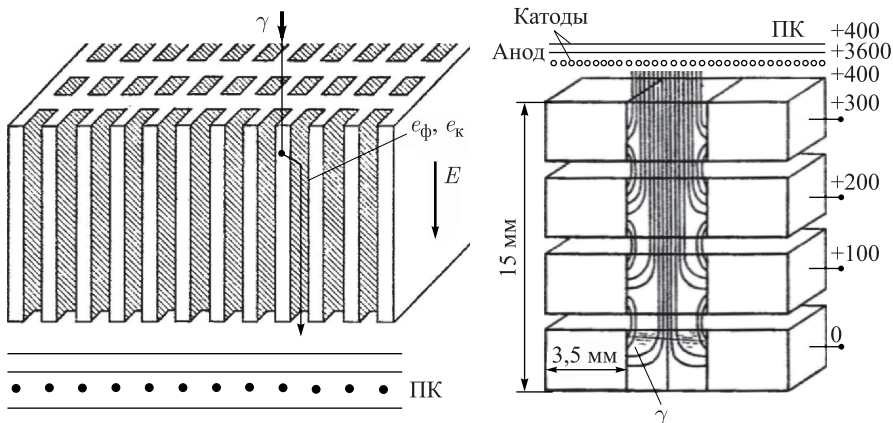


Рис. 1. Конверторы-коллиматоры для мягких γ -квантов

зующиеся при этом фотоэлектроны локализируются на анодах камеры. Были развиты два метода [1].

1. Дрейфовое пространство заполняется твердыми конверторами, имеющими каналы для получения электронов ионизации от электронов конверсии. Поле переносит электроны ионизации к анодам пропорциональной камеры, где они создают электронную лавину.

2. Катоды камеры изготавливаются из подходящего конвертора, и испускаемые ими электроны регистрируются камерой. Эффективность достигается путем использования сборки из достаточного числа камер.

В работах [2–4] для регистрации γ -квантов, образовавшихся в результате аннигиляции замедлившихся позитронов с атомными электронами среды, использовались по две пропорциональные камеры, расположенные слева и справа от области аннигиляции. Увеличение эффективности регистрации γ -квантов достигалось с помощью конверторов, расположенных по обеим сторонам каждой камеры. Конструкция конвертора и формирование дрейфового поля в сборке показаны на рис. 1. При площади камер 48×48 см и толщине газового зазора между катодами в камере 8 мм эффективность установки составляла около 10%, а пространственное разрешение (FWHM) 6 мм. В работах [5–7] были достигнуты лучшие результаты. В камере площадью 10×10 см пространственное разрешение (FWHM) составляло 1,5 мм, а эффективность 15%.

Методика, сочетающая газонаполненные камеры с твердотельными конверторами-коллиматорами, развивалась в направлении увеличения плотности отверстий. При этом диаметр отверстий и их шаг старались выполнить минимально возможными.

тервале углов $30^\circ-90^\circ$ относительно направления излучения (рис. 2, *a*), что также способствует углублению фотоэлектрона в вещество. Удельные потери энергии фотоэлектронами в зависимости от вещества конвертора могут быть ≥ 8 кэВ/мкм. Например, при расположении конвертора перпендикулярно к направлению квантов с энергией 100 кэВ в газ детектора выйдут электроны, образовавшиеся в слое конвертора толщиной меньше 10 мкм. Фактически этот слой и является реальным конвертором. Если даже таких слоев 50, т. е. 25 камер по 2 катода в каждой [8], то общая эффективная толщина конвертора составит $0,01 \times 50 = 0,5$ мм. Для того чтобы с конверторами из олова ослабить поток рентгеновских квантов примерно в e раз и иметь эффективность $\approx 60-65\%$, суммарная эффективная толщина конверторов должна быть не менее 2 мм.

2. ПРИМЕР ВАРИАНТА ДЕТЕКТОРА

Взаимодействие γ -кванта с веществом характеризуется вероятностью его взаимодействия с атомом или с ядром вещества. В силу этих особенностей параллельный пучок γ -квантов при прохождении через толщину материала t ослабляется по экспоненциальному закону

$$n = n_0 \exp(-\mu t), \quad \text{где} \quad \mu = \sigma N \text{ см}^{-1}, \quad (1)$$

n_0 — число γ -квантов, падающих на слой толщиной t ; n — число γ -квантов с той же энергией и с тем же направлением после слоя материала; μ — линейный коэффициент ослабления с размерностью $\text{см}^2/\text{г}$; σ — сечение фотоэффекта; N — число атомов в 1 см^3 . Коэффициенты ослабления для различных веществ приведены на рис. 2, *б* [9].

Вторичные электроны, возникающие при фотоэлектрическом поглощении γ -квантов, имеют весьма характерное угловое распределение. При малых энергиях электроны вылетают в основном в направлении, перпендикулярном направлению γ -квантов; при больших же энергиях — практически вперед. Угловые распределения фотоэлектронов приведены на рис. 2, *a* [10].

Из физики фотоэффекта следует, что γ -квант для взаимодействия с электроном атома вещества должен проходить в нем достаточно большое расстояние. Образовавшемуся фотоэлектрону для выхода в объем рабочего газа камеры необходимо обеспечить малые пробеги в веществе конвертора. Это связано с большими ионизационными потерями электрона в конверторе. Совместно оба требования в области энергий γ -квантов 50–500 кэВ можно реализовать, если конверторы из вольфрама или рения толщиной 5–100 мкм расположить под углом $6^\circ-9^\circ$ относительно направления излучения. Необходимое положение конвертора показано на рис. 3. Толщина конвертора определяется из переданной электрону энергии в процессе фотоэффекта и величиной ионизационных потерь электрона в материале конвертора. При

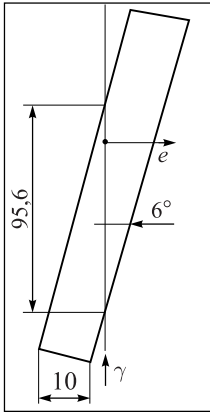


Рис. 3. Длина пути γ -кванта в конвертере. Размеры в микрометрах

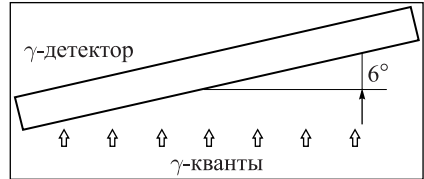


Рис. 4. Расположение детектора на пути γ -квантов

расположении конвертера под углом 6° относительно направления излучения γ -квант проходит в нем 96 мкм, а электроны, из-за пространственного распределения будут иметь пробеги в пределах толщины конвертера.

Отметим, что расположение конвертеров в объеме камеры под малыми углами приведет к усложнению конструкции детектора. Будет намного проще, если конвертеры установить параллельно направлению движения γ -квантов, а полностью собранный детектор расположить так, как показано на рис. 4.

Для определения пробегов электронов в различных веществах используют экстраполированный пробег, $\text{мг}/\text{см}^2$, который слабо зависит от вещества [9]. На практике для этих целей пользуются графиком для пробегов в алюминии [9], вводя поправку с помощью соотношения

$$R_X = R_{\text{Al}} \frac{(Z/A)_X}{(Z/A)_{\text{Al}}}, \quad (2)$$

где R — пробег; Z/A — отношение заряда к атомной массе для Al и элемента X . Удельные потери электронов в рении можно определить из удельных потерь электронов в кремнии [9] с помощью соотношения

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Re}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Si}} \cdot \frac{\rho_{\text{Re}}}{\rho_{\text{Si}}}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{Re}} = 21,02 \text{ г}/\text{см}^3$ и $\rho_{\text{Si}} = 2,33 \text{ г}/\text{см}^3$ — плотность рения и кремния. Удельные потери 100-кэВ электронов в кремнии равны $\approx 0,75 \text{ кэВ}/\text{мкм}$. В рении потери фотоэлектрона составят $6,8 \text{ кэВ}/\text{мкм}$.

На рис. 5 показана схематическая конструкция газового координатного детектора (вид сверху). Если рисунок выполнить в масштабе и повернуть

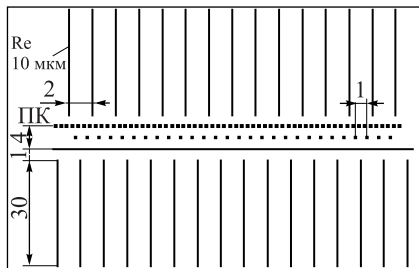


Рис. 5. Схема конструкции детектора γ -квантов

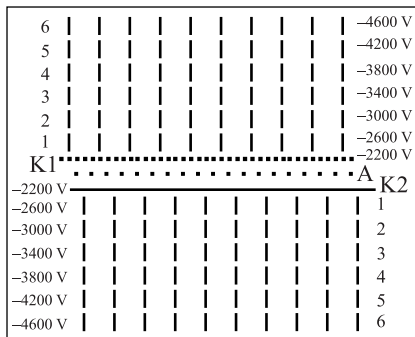


Рис. 6. Разбиение конверторов на дрейфовые ячейки

на 6° (см. рис.4), то будет видно, что на пути γ -кванта при его падении на камеру всегда будут находиться четыре слоя конверторов из Re (заряд атома рения 75, плотность $21,02 \text{ г/см}^3$). Суммарная эффективная длина пробега γ -кванта составит 383 мкм. Фольги могут быть натянуты параллельно или перпендикулярно анодным проволокам. Их длина равна длине анодных проволок либо ширине чувствительной площади камеры. При коэффициенте ослабления $\mu \approx 5,3 \text{ см}^2/\text{г}$ в рении поток γ -квантов с энергией 100 кэВ согласно выражению (1) ослабится на 99%.

Чтобы обеспечить дрейф электронов ионизации к аноду камеры с постоянной скоростью, конверторные слои разбиты на стрипы шириной по 5 мм. Стрипы с одинаковыми номерами в дрейфовых ячейках (рис. 6) подключаются к соответствующему месту резисторного делителя высокого напряжения.

Катодные плоскости пропорциональной камеры намотаны во взаимноперпендикулярном направлении с шагом 0,5 мм. Они выполнены из бериллиевой проволоки диаметром 70 мкм. Проволоки катодов объединены в стрипы шириной по 3,5 мм. Индуцированные на них заряды от электронной лавины через высоковольтные конденсаторы поступают на кодировщики заряд-код. Скорость счета камеры с указанными геометрическими параметрами в газе 80% $\text{CF}_4 + 20\% \text{C}_4\text{H}_{10}$ будет равна $2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ [11]. Максимальное время дрейфа электронов ионизации до анода равно 240 нс.

Предложенный вариант положения конверторов в детекторе проверялся на небольшом макете с чувствительной площадью $32 \times 150 \text{ мм}$. В качестве конвертора использовалась фольга из рения толщиной 10 мкм. Дрейфовые ячейки макета в количестве 2×16 штук и их размеры аналогичны схеме детектора, показанного на рис. 6. Камера продувалась газом 80% $\text{CF}_4 + 20\% \text{C}_4\text{H}_{10}$, а в качестве источника γ -квантов использовался ^{241}Am . Поток γ -квантов контролировался сцинтилляционным счетчиком с цилиндрическим кристаллом $\text{NaI}(\text{Te})$ диаметром 30 мм. Были получены следующие результаты:

эффективность камеры без конверторов составила 9,5 %, с конверторами — 69 %. Следует отметить, что полученные результаты не являются окончательными, так как для максимальной энергии γ -квантов, равной 59,5 кэВ, от источника ^{241}Am толщина используемого конвертора больше требуемой более чем в полтора раза и часть фотоэлектронов не могли выйти из конверторов.

Таким образом, из полученных результатов следует, что новое положение конверторов и их структура действительно повышают эффективность регистрации γ -квантов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Charpak G.* Application of Proportional Chambers to Some Problems in Medicine and Biology // Nucl. Instr. Meth. 1978. V.56. P. 1.
2. *Lim C. B. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1974. NS-21 (1). P. 85.
3. *Lim C. B. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975. NS-22 (1). P. 388.
4. *Hattner R. S. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1976. NS-23 (1). P. 523.
5. *Jeavons A. P., Charpak G., Stubbs R. J.* // Nucl. Instr. Meth. 1975. V. 124. P. 491.
6. *Jeavons A. P., Gate C.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1976. NS-23 (1). P. 640.
7. *Jeavons A. P. et al.* A High Resolution Proportional Chamber Camera and Its Applications. CERN DD 77-15, 1977.
8. *Bateman J. E., Connolly J. F.* A MWPC Gamma Camera for Imaging ^{99m}Tc Radionuclide Distributions. RL 77-031/B, 1977.
9. *Бабичев А. П. и др.* Физические величины. М.: Энергоатомиздат, 1991.
10. *Калашникова В. И., Козодаев М. С.* Детекторы элементарных частиц. М.: Наука, 1966.
11. *Gushcin E. M. et al.* Fast Beam Chambers of the Set-Up ISTRА-M // Nucl. Instr. Meth. A. 1991. V. 351. P. 345.

Получено 28 августа 2017 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 14.09.2017.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,63. Уч.-изд. л. 0,96. Тираж 255 экз. Заказ № 59232.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/