

УДК 539.122

## КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ДЕТЕКТОР ГАММА-КВАНТОВ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Г. МКРТЧЯН, Г.А. АЙВАЗЯН, В.В. НАЛБАНДЯН, М.М. МИРЗОЯН,  
А.Н. САРГСЯН, А.А. АРШАКЯН

Институт прикладных проблем физики НАН Армении

(Поступила в редакцию 11 марта 2005 г.)

Рассмотрена возможность создания принципиально новых детекторов гамма-квантов рентгеновского диапазона энергий, работающих на основе явления рождения, дрейфа и размножения дельта-электронов. Приведены результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов лавинообразно размноженных дельта-электронов в созданных пористых слоях на основе щелочно-галогидных соединений ( $\text{CsI}$ ,  $\text{CsCl}$  и т.д.) при наличии внешнего ускоряющего поля. В качестве источников гамма-квантов были использованы изотопы  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{241}\text{Am}$ , которые имеют характерные выходы в диапазоне энергий 1-600 кэВ. Подтверждена возможность применения созданных пористых слоев как основ для регистрирующих систем гамма-квантов с высокой эффективностью в широком диапазоне энергий, координатным разрешением  $\sim 50$  мкм и рекордным быстродействием  $\sim 0,1$  нс.

В последние годы усовершенствование методов регистрации ионизирующего излучения ограничивалось трудностями принципиального характера, что не позволяло достичь скорости счета детекторов больше, чем  $10^8$  частиц в секунду и координатного разрешения меньше, чем 1 мм [1-4]. Так, например, скорость счета в газовых камерах ограничена скоростью дрейфа и диффузией носителей тока, а в сцинтилляционных счетчиках – временем высвечивания сцинтиллятора, распространением света через сцинтиллятор и временем пролета электронов через диодную систему фотоэлектронного умножителя. Поэтому, наряду с усовершенствованием традиционных методов регистрации, более важными являются исследования в области создания принципиально новых методов регистрации.

В этом аспекте большой практический интерес представляют исследования в области создания детекторов на основе явлений рождения, дрейфа и размножения вторичных электронов в пористых конденсированных средах. Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию этих процессов в созданных нами пористых слоях на основе диэлектриков и полупроводников при наличии и отсутствии внешнего ус-

корящего электрического поля, а также изучению возможности создания принципиально нового детектора на основе этих явлений.

Для описания процессов рождения, дрейфа и размножения дельта-электронов в пористом слое представим последний как совокупность хаотично расположенных динодов, относительная пространственная ориентация и расстояния между которыми могут быть совершенно разными. Если размеры динодов достаточно малы по сравнению с длиной свободного пробега эмиссионных электронов, то электроны с большой вероятностью, не успев термализоваться, вылетят из вещества динодов и попадут в междинодное пространство – вакуум, где под воздействием приложенного к слою ускоряющего электрического поля приобретут дополнительную энергию, которая позволит преодолеть междинодное расстояние, и сталкиваясь с каким-либо динодом, вызовут вторичную электронную эмиссию (ВЭЭ). Причем эмиссионные явления возникают как при отражении, так и при прохождении. Вновь образованные электроны ВЭЭ, в свою очередь, ускоряясь полем в междинодном пространстве, сталкиваются с другим динодом и вызывают ВЭЭ. Таким образом происходит лавинообразный процесс, т.е. перенос заряженной частицы через пористый слой можно представить как каскадный процесс, когда при каждом акте каскада имеет место ВЭЭ. Коэффициент ВЭЭ  $\sigma$  зависит от энергии электрона  $\varepsilon$  и эмиссионных свойств динодов  $\beta$  следующим образом:

$$\sigma = \beta \varepsilon^{0.5}. \quad (1)$$

По мере продвижения заряженных частиц через слой коэффициент ВЭЭ может уменьшаться ( $\sigma < 1$ ), оставаться неизменным ( $\sigma = 1$ ) или увеличиваться ( $\sigma > 1$ ). Соответственно, будет иметь место поглощение, дрейф или размножение. Очевидно, что наложением ускоряющего поля можно контролировать эмиссионные свойства данного слоя.

Теперь рассмотрим возможность математического моделирования процесса лавинообразного размножения заряженных частиц. С этой целью были смоделированы случайные процессы методами авторегрессии, скользящего среднего, диффузионного, Пуассона, самовозбуждения и взаимного возбуждения [5-10]. Были рассмотрены случаи точечного единичного и линейчатого эмиссионных источников.

В случае точечного источника моделирование начинается с розыгрыша точки ионизации  $(x_0, y_0)$  (см. рис.1). Испускаемые вторичные электроны рождаются в основном в тонком приповерхностном слое вещества, в пределах характерной глубины выхода, определяемой длиной ионизационного пробега  $\lambda_i$ , которая в свою очередь определяется эффективным сечением ионизации и плотностью вещества мишени. Принимая распределение  $y_0$  на этой глубине равномерным, можно определить его оператором

$$y_0 = \lambda_i \times \text{random} \quad (2)$$

где random – датчик случайных чисел в интервале  $[0,1]$ . При фиксированной координате  $x_0$  можно полагать  $x_0=0$ . Далее разыгрывается случайная величина, определяющая вероятности выбывания  $\delta$ -электронов.

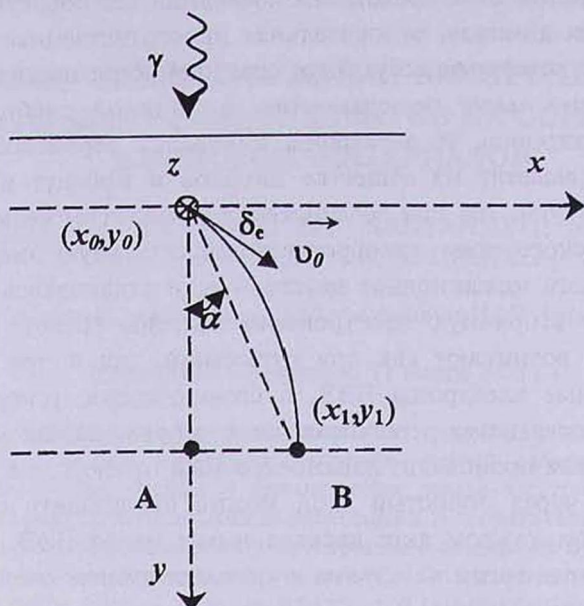


Рис.1. Схематическая картина первого акта ионизации и эмиссии  $\delta$ -электрона.

Для описания движения вторичного электрона в сильном электрическом поле воспользуемся соответствующей линеаризацией уравнений движения. При этом нами получено аналитическое выражение для определения потенциала  $\varphi(x,y)$  поля проволочного детектора в любой точке рабочего объема:

$$\varphi(x,y)=V \left[ 2 \ln \frac{\text{sh} \frac{\pi d}{l}}{\text{sh} \frac{\pi r}{l}} \right]^{-1} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (-1)^k \ln \frac{\text{sh}^2 \frac{\pi d}{l} (2k+1) + \sin^2 \frac{\pi x}{l}}{\text{sh}^2 \frac{\pi d}{l} (2k + \frac{y}{d}) + \sin^2 \frac{\pi x}{l}}, \quad (3)$$

где  $V$  – напряжение, подаваемое на проволоки,  $r$  – диаметр проволоки,  $d$  – толщина слоя,  $l$  – зазор между двумя анодными (катодными) проволоками.

Пусть в точке  $(x_0, y_0)$  произошла ионизация с эмиссией электрона с поперечным и продольным компонентами скорости  $v_{0x}$  и  $v_{0y}$ , соответственно (рис.1). Разыгрывается азимутальный угол  $\theta_0$  вылета электрона по формуле

$$\theta_0 = f(\beta, \varepsilon_{\delta}) \times \text{random}, \quad (4)$$

где  $f(\beta, \varepsilon_{\delta})$  описывает дифференциальное сечение  $\delta$ -электронов с учетом эмиссионных свойств вещества и энергии первичного электрона. Далее

разыгрываем длину свободного пробега для эмиссионных электронов

$$\lambda_{\delta e} = \ln(\text{random})/\eta, \quad (5)$$

где  $\eta$  – константа, характеризующая свойства данной пористой среды. Для нахождения точки  $(x_1, y_1)$  сначала, зная длину свободного пробега, определяем время  $t_0$  в пути, пренебрегая горизонтальной составляющей:

$$\lambda_{\delta e} = 0,5at_0^2, \quad (6)$$

где  $a = eE/m_e$  – ускорение,  $e$  – заряд электрона,  $m_e$  – масса электрона,  $E$  – напряженность электрического поля. Перемещение в горизонтальном направлении вычисляем по правилу

$$x_1 - x_0 = v_{0x}t_0, \quad (7)$$

а в вертикальном – полагаем, что

$$y_1 = y_0 + \lambda_{\delta e}. \quad (8)$$

Далее процесс повторяется. Заметим, что вероятность эмиссии вторичных электронов зависит от энергии электрона и эмиссионных свойств данного слоя. На рис.2 приведены траектории лавинообразно размноженных электронов для пористого слоя щелочно-галогенидного соединения CsI с относительной плотностью  $\rho/\rho_0 = 2\%$ , толщиной  $d = 350$  мкм и напряжением ускоряющего поля  $V = 1200$  В при бомбардировке слоя гамма-квантами с энергиями 1 кэВ, 2 кэВ и 5 кэВ.

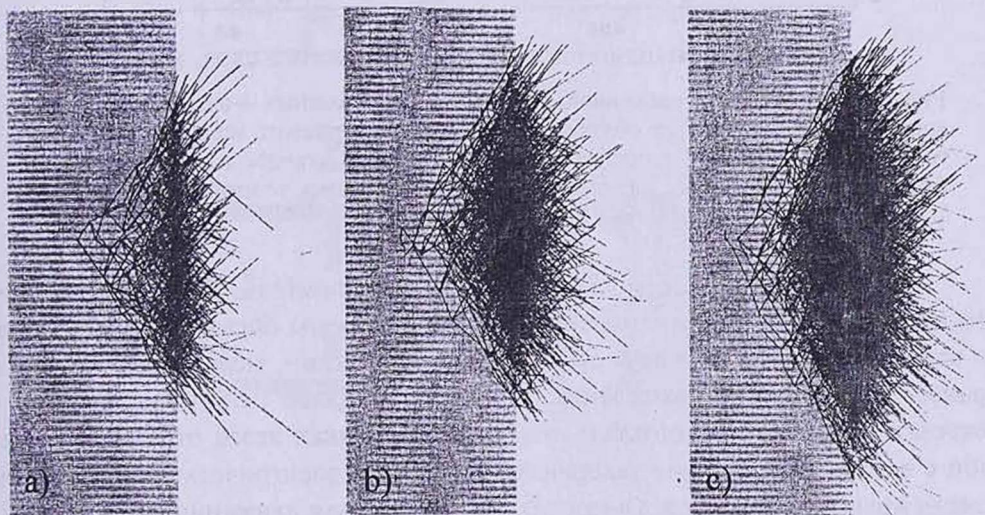


Рис.2. Траектории лавинообразно размноженных  $\delta$ -электронов в пористых слоях щелочно-галогенидного соединения CsI с толщиной 350 мкм и относительной плотностью 2% при наложении на слой ускоряющего поля с напряжением 1200 В для первоначально ионизирующих слой гамма-квантов с энергиями 1 кэВ, 2 кэВ и 5 кэВ, соответственно а), б) и в).

Рассчитаны также распределения лавины электронов на выходной поверхности для пористых слоев разной толщины, относительной плотности и химического состава при одинаковом времени набора счета. На рис.3 приведены соответствующие распределения  $\delta$ -электронов на выходной поверхности пористых слоев разной толщины при облучении мишеней излучением мессбауэровского источника гамма-квантов  $^{57}\text{Co}$ . Как видно из этих рисунков, увеличение толщины исследуемого образца приводит к уширению фронта электронно лавины и увеличению коэффициента ВЭЭ. Аналогичная картина получается при уменьшении относительной плотности и при увеличении напряжения ускоряющего поля.

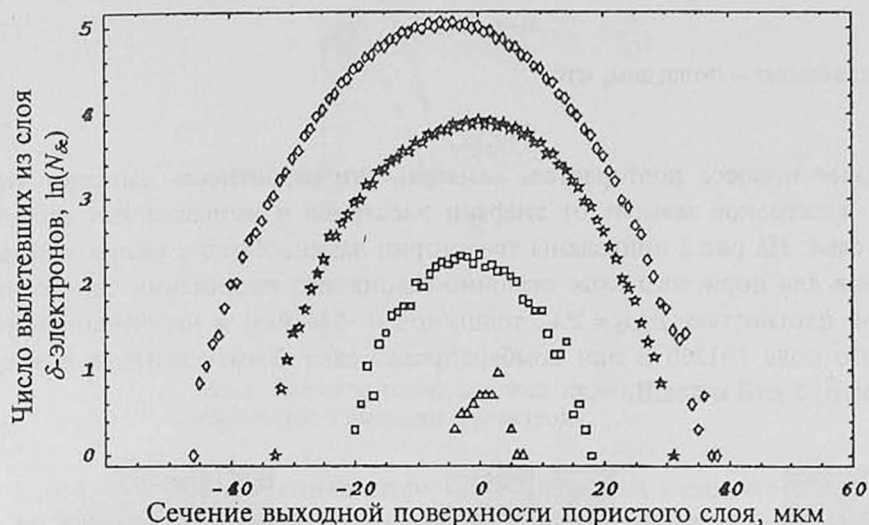


Рис.3. Распределения числа лавинообразно размноженных  $\delta$ -электронов на выходной поверхности при облучении мишени из пористого щелочно-галогидного соединения CsI с относительной плотностью  $\rho_0/\rho=2\%$  излучением мессбауэровского источника гамма-квантов  $^{57}\text{Co}$  для разных толщин:  $\Delta$  —  $d=50$  мкм;  $\square$  —  $d=150$  мкм;  $\star$  —  $d=300$  мкм;  $\diamond$  —  $d=500$  мкм.

В этом случае имеем дело с точечным источником. В случае линейного источника, т.е. когда первичные дельта-электроны образуются не в точке, а вдоль некоторой, случайно ориентированной линии, моделирование, как и ранее, начинается с нахождения точки  $(x_0, y_0)$ . Далее разыгрывается угол  $\alpha$  отрезка АВ (рис.1) и допустим, что в десяти точках этого отрезка испускаются электроны, которые ускоряются в сильном электрическом поле, ионизируя другие атомы и т.д. Очевидно, что траектория движения каждого электрона описывается такими же уравнениями, что и вышеизложенные.

Из результатов моделирования очевидно, что, выбирая расстояние между проволоками, толщину и относительную плотность пористых слоев, можно создать координатно-чувствительные детекторы с определенной координатной разрешаемостью. Временное разрешение такого детектора опре-

деляется временем пролета электрона через пористую среду и, в данном случае, может составлять порядка  $10^{-10}$  с.

С целью подтверждения вышеуказанных теоретических предположений был проведен ряд экспериментальных исследований. При этом были использованы изотопы  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{241}\text{Am}$  как стандартные источники излучения гамма-квантов, у которых характерные спектры излучения перекрывают диапазон энергий от  $\sim 1$  кэВ до  $\sim 600$  кэВ. Работы проводились при напряжениях ускоряющего поля от 800 В до 2000 В.

Пористые слои изготавливались путем вакуумного термического и ионного напыления соответствующих поликристаллов в атмосфере сухого инертного газа при определенных условиях (давление, скорость вращения подложки и т.д.) [11,12]. При этом в зависимости от давления газа получают пористые слои с относительной плотностью  $0,3\% \div 10\%$ . В основном, для созданных пористых сред использовались соединения щелочных металлов (KCl, KF, CsCl, CsI) и кремния, а также были использованы некоторые более сложные химические соединения, обеспечивающие высокие эмиссионные свойства.

Для регистрации быстродействующего выходного аналогового сигнала детектора ( $10^{-8} \div 10^{-10}$  с) был разработан и методом литографического насаждения создан СВЧ  $\rightarrow$  ВЧ формирователь-преобразователь. Был также разработан и создан десятиразрядный аналого-цифровой преобразователь с высоким входным сопротивлением и временем преобразования  $10^{-7}$  с.

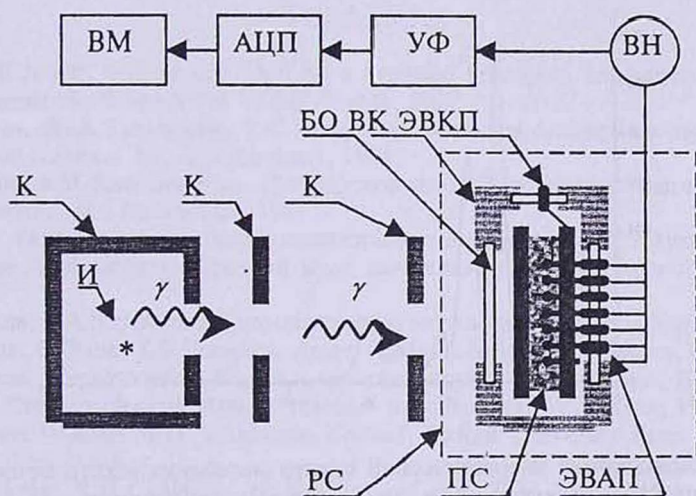


Рис.4. Схема экспериментальной установки: И – источник гамма-квантов; К – коллиматоры; ВН – блок высокого напряжения; УФ – усилитель-формирователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ВМ – вычислительная машина; РС – регистрирующая система; БО – бериллиевое окно; ПС – пористый слой; ЭВАП – электрические выводы анодных проволок; ЭВКП – электрические выводы катодных проволок; ВК – вакуумная камера.

Эксперименты проводились по схеме, приведенной на рис.4. Пучок гамма-квантов, проходя сквозь систему коллиматоров и бериллиевое окно (БО) вакуумной камеры (ВК), падает на пористый слой (ПС). Специальным методом обеспечено вакуумное уплотнение бериллиевого окна, имеющее толщину 150 мкм и диаметр 3 см, с вакуумной камерой, изготовленной из нержавеющей стали. При взаимодействии с пористым слоем гамма-кванты вызывают поверхностную ионизацию и выбивание первичных  $\delta$ -электронов. Рожденные  $\delta$ -электроны ускоряются в порах пористого слоя под воздействием внешнего электрического поля, создаваемого постоянным напряжением, подаваемым на электрические контакты ЭВАП и ЭВКП, соединенные соответственно с анодными и катодными проволоками из AuW с диаметром 28 мкм. Разогнанные электроны, в свою очередь, выбивают новые  $\delta$ -электроны из вещества пористого слоя. Далее процесс повторяется и приводит к лавинообразному размножению электронов, что сопровождается возникновением импульсного тока. По стандартной электрической схеме импульсный ток преобразуется в напряжение и на выходе регистрирующей системы получается аналоговый импульсный сигнал с длительностью  $\sim 10^{-9}$  с. Аналоговый импульсный сигнал с регистрирующей системы подается на СВЧ $\rightarrow$ ВЧ формирователь-преобразователь, а затем на вход аналого-цифрового преобразователя, который присоединен к вычислительной машине, где и обрабатывается и накапливается специально созданным программным обеспечением [13,14].

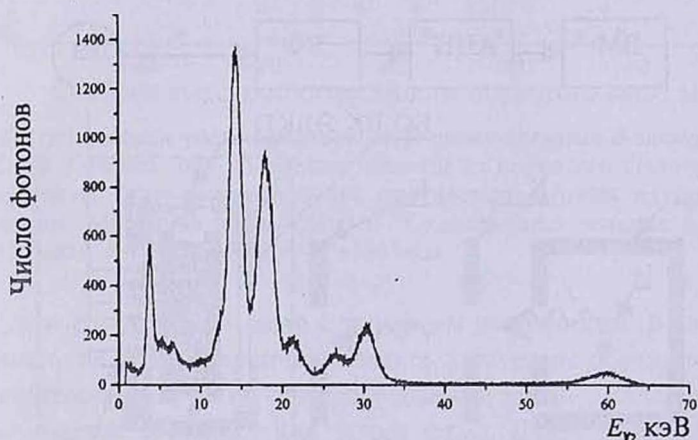


Рис.5. Характерный энергетический спектр мессбауэровского источника излучения  $^{241}\text{Am}$ , зарегистрированный пористым детектором.

На рис.5 приведен характерный энергетический спектр мессбауэровского источника излучения гамма-квантов  $^{241}\text{Am}$ , регистрируемый координатно-чувствительной регистрирующей системой, работающей в интегральном режиме. На рисунке четко выделяются характерные энергетические выходы, энергетическое разрешение которых составляет  $\sim 10\%$  в широком диапазоне

энергий. Аналогичные характеристические спектры получены для источников гамма-квантов  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Co}$  и  $^{60}\text{Co}$ . Путем выборки подаваемого ускоряющего напряжения можно достичь до 90% эффективности регистрации в необходимой области энергий. Были также проведены экспериментальные исследования по определению координатного разрешения созданного детектора. Эксперименты проводились при различных значениях напряжения ускоряющего поля, толщины пористого слоя, относительной плотности и зазора между двумя анодными проволоками.

Наилучшими энергетическими и временными параметрами обладала регистрирующая система гамма-квантов рентгеновского диапазона энергии, изготовленная на основе комплекса соединений  $\text{CsI}(\text{SiO})^1$  [15] с относительной плотностью 2% и толщиной 500 мкм, при этом расстояние между центрами двух анодных проволок составляло 50 мкм, что обеспечивало соответствующее координатное разрешение.

На основе полученных экспериментальных данных можно утверждать, что созданные пористые слои при определенных условиях являются быстродействующими умножителями электронов. Созданные регистрирующие системы на основе полученных пористых слоев обладают уникальными параметрами и очень чувствительны к гамма-излучению в широком диапазоне энергии. Предлагаемая теоретическая модель хорошо описывает процессы, возникающие при взаимодействии гамма-квантов с пористыми слоями при наличии внешних полей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. H.Bubert, H.Jenett. Surface and Thin Film Analysis: Principles, Instrumentation, Applications. Darmstadt, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002.
2. А.И.Абрамов, Ю.А.Казанский, Е.С.Матусевич. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М., Энергоиздат, 1985.
3. Ю.К.Акимов, А.И.Калинин и др. Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение. М., Атомиздат, 1967.
4. Г. Е.Пикус. Основы теории полупроводниковых детекторов. М., Наука, 1965.
5. У.Гренандер, В.Фрайберг. Краткий курс вычислительной статистики. М., Наука, 1978.
6. С.М.Ермаков, Г.А.Михайлов. Статистическое моделирование. М., Наука, 1982.
7. M.E.Johnson, C.Wang, J.S.Ramberg. Amer. J. Math. & Manag. Sciences, 4, 225 (1984).
8. С.М.Ермаков. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. М., Наука, 1971.
9. К.Мардиа. Статистический анализ угловых наблюдений. М., Наука, 1978.
10. R.N.Bracewell. The Hartley Transform. Oxford, Oxford University Press – New York, Clarendon Press, 1986.
11. A.H.Mkrtchyan, R.H.Ghajoyan, et al. Proc. of the ISTC Int. Seminar "Conversion Potential of Armenia and ISTC Programs", October 2-7, Yerevan, Armenia, 163 (2000).
12. A.H.Mkrtchyan, R.H.Ghajoyan, et al. Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Symp. on Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures, September 10-14, Lake Aya, Altai Mountains, Russia, 38 (2001).
13. Р.Э.Блейхут. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М., Мир, 1989.
14. Л.М.Гольденберг. Цифровая обработка сигналов. М., Радио и связь, 1990.
15. А.Р.Мкртчян, А.Г.Мкртчян. Рентгеночувствительные пористые пленки. Патент РА, P20030103 (2004).

ԾԱԿՈՏԿԵՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ԳԱՄՍԱ-ՔՎԱՆՏՆԵՐԻ  
ԿՈՈՐԴԻՆԱՏԱԶԳԱՅՈՒՆ ԱՐԱԳԱԳՈՐԾ ԳՐԱՆՑԻՉ

Ա.Հ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Գ.Ա. ԱՅՎԱԶՅԱՆ, Վ.Վ. ՆԱԼԲԱՆԴՅԱՆ, Մ.Մ. ՄԻՐԶՈՅԱՆ,  
Ա.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ա.Ա. ԱՐՇԱԿՅԱՆ

Աշխատանքը նվիրված է դելտա-էլեկտրոնների ծնման, դրեյֆի և բազմացման երևույթների հիման վրա ռենտգենյան տիրույթի զամմա-քվանտների սկզբունքորեն նոր գրանցիչների պատրաստման բնագավառի հետազոտություններին: Բերված են արտաքին արագացնող դաշտի առկայությամբ հիմնային մետաղների միացությունների (CsI, CsCl և այլն) հիման վրա ստեղծված ծակոտկեն շերտերում դելտա-էլեկտրոնների հեղեղային բազմացման փորձնական հետազոտությունների և տեսական հաշվարկների արդյունքները: Որպես զամմա-քվանտների աղբյուրներ օգտագործվել են  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$  և  $^{241}\text{Am}$  իզոտոպները, որոնք ունեն բնութագրական ելքեր  $1\div 600$  կէՎ էներգիական տիրույթում: Հիմնավորված է, որ ստեղծված ծակոտկեն շերտերը կարող են հիմք հանդիսանալ լայն էներգիական տիրույթում բարձր էֆեկտիվությամբ,  $\sim 50$  մկմ կոորդինատային լուծողականությամբ և  $\sim 0,1$  նվրկ ռեկորդային արագագործությամբ զամմա-քվանտների գրանցիչ համակարգերի համար:

COORDINATE-SENSITIVE HIGH-SPEED DETECTOR OF GAMMA QUANTA  
BASED ON POROUS MATERIALS

A.H. MKRTCHYAN, G.A. AYVAZIAN, V.V. NALBANDYAN, M.M. MIRZOYAN,  
A.N. SARGSYAN, A.A. ARSHAKYAN

We study an opportunity to create principally new detectors of gamma quanta of the X-ray energy range operating on the basis of the phenomena of the delta-electrons emission, drift and multiplication. The results of experimental researches and theoretical calculations of delta-electrons' avalanched multiplication in the developed porous layers on the basis of alkaline haloids (CsI, CsCl, etc.) in the presence of external accelerating field are presented. As sources of gamma quanta the isotopes  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$  and  $^{241}\text{Am}$  were used, which have characteristic yields in the energy range  $1\div 600$  keV. The feasibility of utilization of the developed porous layers as bases for gamma-quanta registering systems with high efficiency in wide energy range, coordinate resolution  $\sim 50$   $\mu\text{m}$  and record speed  $\sim 0,1$  ns is confirmed.