

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԾԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЕФИ-516(3)-82

А. Т. МАРГАРЯН

РЕГИСТРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ПЕРЕХОДНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКИХ
КОНВЕРТЕРОВ

ԵՐԵՎԱՆ 1982 ԵՐԵՎԱՆ

EDM-5I6(3)-82

A.T.MARGARIAN

X-RAY TRANSITION RADIATION DETECTION WITH USE OF
THIN CONVERTERS

A new method for the detection of X-ray transition radiation (XTR) based on using thin converters is proposed. By means of the Monte Carlo technique the physical processes are simulated as well as the calculations for specific variants of XTR detectors are given.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1981

ЕФИ-516(3)-82

УДК. 538.56:539.12:539.1.074

А. Т. МАРГАРЯН

РЕГИСТРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ПЕРЕХОДНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКИХ КОНВЕРТЕРОВ.

Предлагается новый принцип регистрации квантов рентгеновского переходного излучения (РПИ), основанный на использовании тонких конвертеров. Методом Монте-Карло моделируются физические процессы, приводятся расчетные характеристики для конкретных вариантов детекторов РПИ.

Ереванский физический институт

Ереван 1982

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЕФИ-516(3)-82

А.Т.МАРГАРЯН

РЕГИСТРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ПЕРЕХОДНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКИХ КОНВЕРТЕРОВ

Ереван 1982

© Ереванский физический институт, 1982

1. Введение

Детекторы на основе рентгеновского переходного излучения (РПИ) уже применяются в физике высоких энергий для регистрации и идентификации заряженных частиц с лоренц-фактором $\gamma = E/mc^2 = 10^3 + 10^4$. На практике часто применяются детекторы РПИ на основе метода энерговыделения [1,2]. Эти детекторы состоят из двух основных частей: из радиатора, в котором образуются кванты РПИ, и расположенной за радиатором регистрирующей системы, в которой выделяется энергия за счет поглощения квантов РПИ и ионизационных потерь первичной частицы. В качестве регистрирующей системы используются газовые пропорциональные или дрейфовые камеры (ПДК). Для эффективного поглощения квантов РПИ в качестве рабочего газа ПДК как правило используется ксенон. Наиболее перспективным является предложенный в [3,4] и осуществленный в [5,6] оптимальный вариант этих детекторов, основанный на регистрации числа квантов РПИ.

В этой работе предлагается новый принцип регистрации РПИ, основанный на использовании конвертера. Толщина и материал кон-

вертера выбираются таким образом, чтобы обеспечить эффективное поглощение квантов РПИ в конвертере и выход образованных в нем фотоэлектронов. Пробеги фотоэлектронов от квантов РПИ для тяжелых веществ более чем на порядок меньше длины среднего свободного пробега квантов РПИ. С уменьшением Z (Z - порядковый номер вещества) эта разница увеличивается. Поэтому конвертер выполняется из многих тонких слоев, чтобы образованные квантами РПИ фотоэлектроны эффективно вышли из них. Регистрирующие устройства устанавливаются за и перед слоями конвертера (рис.1). В качестве пучкового детектора можно использовать конвертер, состоящий из одного тонкого слоя, расположенного под некоторым углом θ к первичному пучку. В этом случае регистрирующие устройства располагаются с обеих сторон конвертера (рис.2).

Из теории РПИ, а также из экспериментальных исследований [7] следует, что можно подбирать такие радиаторы, которые бы позволили идентифицировать заряженные частицы при $\chi \approx 10^5$. Энергия квантов РПИ, вышедших из радиатора при $\chi = 10^3 + 10^4$, находится в интервале (5 + 15) кэВ, а при $\chi = 10^4 + 10^5$ в интервале (15 + 30) кэВ. Кванты РПИ с энергией > 15 кэВ в ксено-не плохо поглощаются. Пробеги образованных ими фотоэлектронов составляют величину \geq мм, поэтому регистрирующие системы из газовых ПДК, как в режиме полного энергосъема, так и в режиме регистрации числа квантов РПИ эффективно работают в области $\chi = 10^3 + 10^4$. Использование конвертеров позволяет создавать детекторы РПИ для $\chi > 10^4$. С другой стороны, так как в новой постановке регистрируются фотоэлектроны, вышедшие из конвертера, существенно меняются требования к регистрирующим системам. Так, например, в качестве рабочего газа ПДК, пред-

назначенного для регистрации фотоэлектронов, больше всего подходит гелий. Фотоэлектроны с энергий $\lesssim 10$ кэВ поглощаются в гелии толщиной 1 см, тогда как ионизационные потери первичной частицы в 1 см гелия составляют ~ 0.3 кэВ. Фотоэлектроны можно регистрировать также другими способами: многослойными искровыми камерами, тонкими полупроводниковыми детекторами, диэлектрическими детекторами; микроканальными пластинами и т.д.

В этой работе методом Монте Карло моделируются физические процессы в детекторах РПИ с использованием тонких золотых конвертеров. Приводятся расчетные характеристики таких детекторов.

2. Взаимодействие электронов с тонкими слоями золота в области энергии. (5 + 30) кэВ.

Характерные энергии квантов РПИ находятся в интервале (5 + 30) кэВ. В этом же интервале будет лежать энергия фотоэлектронов или электронов Оже, образованных квантами РПИ в конвертере. Взаимодействие электронов в этой области энергии с веществом сводится к неупругим и упругим рассеяниям, за счет которых электрон теряет энергию и меняет направление. В этой работе в качестве конвертера были использованы пленки из золота: во-первых потому, что в веществе с большим Z кванты РПИ поглощаются эффективно и, во-вторых, с ростом Z упругое рассеяние электронов преобладает над неупругим, в результате чего уменьшается поглощение в тонких слоях вещества [8]. Перенос электронов в золоте моделировался следующим образом [9]. Путь электрона разделялся на малые отрезки ΔS_i . После каждого отрезка скачкообразно менялись направление и энергия электрона, а также определялась величина следующего отрезка ΔS_i .

Для $E_0 = 30$ кэВ; $\Delta S_0 = 0.062$ мкм, а для E_i

$$\Delta S_i = \left(\frac{E_i}{E_{i-1}} \right) \Delta S_{i-1} ,$$

$$E_i = E_{i-1} \left(1 - \frac{dE}{dS} \right) \Delta S_{i-1} ,$$

где dE/dS энергетические потери электрона, которые для электронов с энергией выше 10 кэВ вычислялись согласно формуле Бете-Блоха. Для электронов с энергией меньше 10 кэВ, когда преобладающими становятся потери энергии на возбуждение плазмонов, эти потери в г.см⁻² золоте брались равными потерям в г.см⁻² висмута [10]. Многократное рассеяние на этих отрезках учитывалось согласно теории Мольера, скорректированной таким образом [11], чтобы можно было применять и в случае прохождения заряженных частиц через малые толщины вещества, когда число столкновений меньше 20. Процесс переноса электрона в веществе продолжается до тех пор, пока он не выходит из него или поглощается, т.е. пока энергия не становится меньше 0.5 кэВ. Для проверки этой модели были вычислены коэффициенты отражения и пропускания в случае, когда на тонкие пленки из золота разных толщин перпендикулярно падают электроны с начальной энергией 4, 7, 9 и 30 кэВ. Как было показано в экспериментах Вятскина и Трунева [8], семейство кривых для коэффициентов отражения и пропускания в этой области энергии можно привести к одной кривой, если толщину пленки измерять в единицах

$$\bar{x} = 16 E_0^{1.6}$$

$$[E_0] \equiv \text{кэВ} , \quad [\bar{x}] \equiv \text{Å} .$$

На рис. 3 и 4 приведены вычисленные нами коэффициенты отражения Γ и пропускания η от \bar{x} совместно с результатами рабо-

ты Вятскина и Трунева. Как видно, расчетные результаты согласуются с экспериментальными данными.

Общая толщина конвертера из золота должна быть $(5 + 10)\mu\text{м}$, чтобы кванты РПИ эффективно поглощались в нем. Для определения оптимальной величины толщины слоев конвертера нами были вычислены коэффициенты поглощения в том случае, когда начальные электроны распределены равномерно и имеют случайное направление в зависимости от толщины слоя для начальных энергий электронов - 5, 10, 15, 20 и 30 кэВ (рис.5).

3. Моделирование детектора РПИ и некоторые результаты

Характеристики детектора РПИ, состоящего из радиатора и конвертера (рис.1,2), были получены в результате расчета, выполненного методом Монте-Карло. Подробное описание процессов образования и поглощения переходного излучения в радиаторах РПИ приведено в работе [12]. В вычислении поглощения квантов РПИ в конвертере из золота учитывался только фотоэффект, сечение которого бралось из работы [13]. Учитывались L и M фотоэлектроны и электроны Оже с L - уровня [14]. Угловое распределение Оже электронов разыгрывалось из равномерного, а фотоэлектронов из следующего распределения [15]:

$$\frac{dn}{d\theta} = [1 + 2\beta(1 + W/T)\cos\theta] \sin^3\theta,$$

где $\beta = v/c$ скорость электрона, W - энергия связи L или M уровня, T - кинетическая энергия образованного фотоэлектрона. Считалось, что вся энергия вышедших из конвертера электронов выделяется в регистрирующих системах. Был проведен расчет ха-

характеристик конкретного детектора РИИ, радиатор которого состоял из 1000 слоев майлара, (толщина и расстояние между слоями 25 мкм и 0,7 мм, соответственно), а непосредственно расположенный за ним конвертер — из 20 слоев золота толщиной 2000 Å. Между слоями конвертера расположена регистрирующая система — газовая ПК толщиной 1 см с гелиевым наполнением. Ионизационные потери релятивистской частицы в газе вычислялись согласно [16]. Характерная величина этих потерь в 1 см He составляет ~ 0.3 кэВ. Электроны же, вышедшие из конвертера, имеют энергию $\gtrsim 5$ кэВ. Если порог срабатывания регистрирующих систем выбрать равным 5 кэВ, то при прохождении через такой детектор электроны с энергией 3,6 ГэВ регистрируются с эффективностью 90%, а заряженные частицы, которые не образуют РПИ, с эффективностью $\leq 5\%$, в случае срабатывания одного и более отсеков, и 70% и 0,2% — в случае срабатывания двух и более отсеков из 20, соответственно. Эти характеристики того же порядка, что и характеристики детектора с тем же радиатором, регистрирующая система которого состоит из 20 слоев ксеноновой ПК, каждая толщиной 0,05 см [3]. Однако, в новом варианте электроны, вышедшие из конвертера, можно регистрировать разными способами: многослойными искровыми камерами [18], тонкими полупроводниковыми детекторами толщиной \sim мкм, диэлектрическими детекторами [17] и т.д.

На рис.6 приведено распределение суммарной энергии квантов РПИ, вышедших из радиатора, при начальных условиях, описанных выше. На рис.7 — распределение суммарной энергии электронов, вышедших из конвертера, выполненного из одного слоя золота толщиной 2000 Å и расположенного непосредственно за радиатором под

углом $\theta = 1/20$ рад к первичному пучку. И в этом случае вероятность выхода из конвертера фотоэлектронов с энергией > 5 кэВ составляет $\sim 90\%$.

Увеличивая число слоев конвертера или уменьшая угол θ , можно увеличить вероятность регистрации квантов РПИ.

Таким образом, проведенные нами расчеты показывают, что детекторы РПИ с использованием конвертеров могут успешно работать как в режиме полного энерговыделения, так и в режиме регистрации числа квантов РПИ.

Автор выражает благодарность А.Ц.Аматуни и Г.А.Вартапетяну за внимание и ценные замечания, а также Г.Л.Баятяну и С.Г.Князян за полезное обсуждение и помощь при выполнении этой работы.

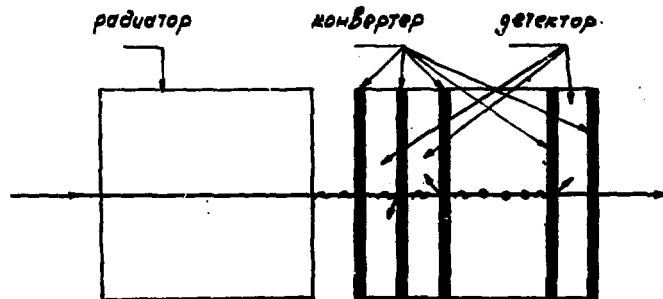


Рис. I Общая схема детектора РПИ с использованием многослойного конвертера.

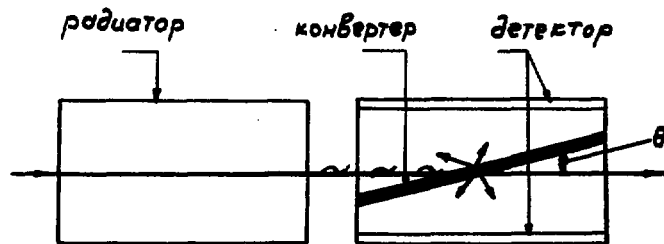


Рис.2 Общая схема детектора РПИ с использованием однослойного конвертера.

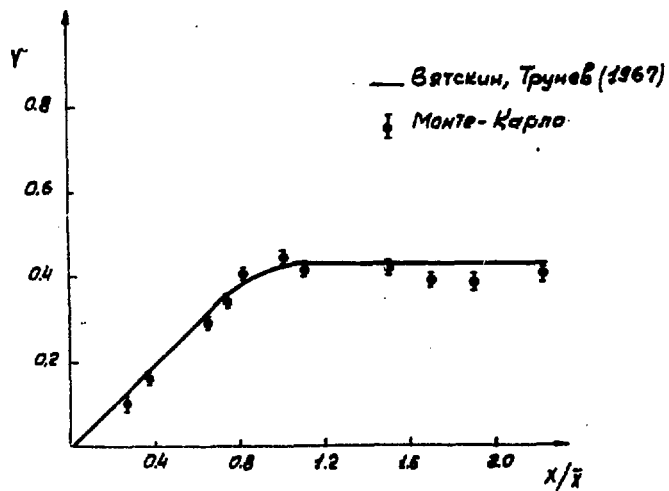


Рис.3 Коэффициенты отражения и пропускания электронов с энергией 5, 7, 9 и 30 кэВ при перпендикулярном падении на фольгу из золота разных толщин. Сплошная кривая соответствует эксперименту Вятского и Трунева.

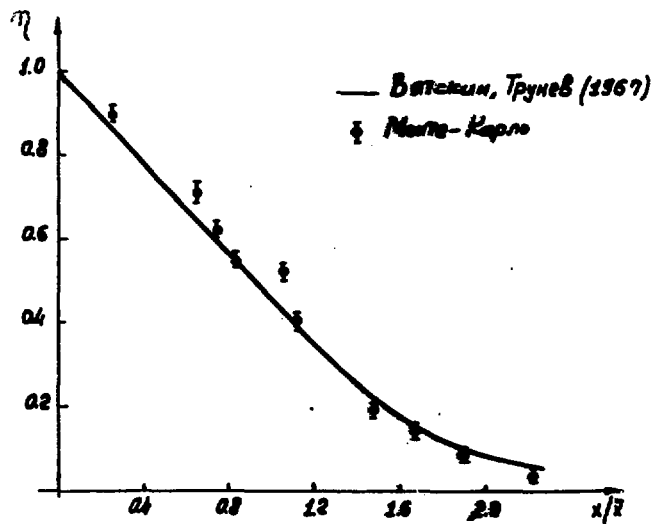


Рис.4 Коэффициент пропускания электронов с энергией 5,7,9 и 30 кэВ при перпендикулярном падении на фольгу из золота разных толщин. Сплошная кривая соответствует эксперименту Вятского и Трунева.

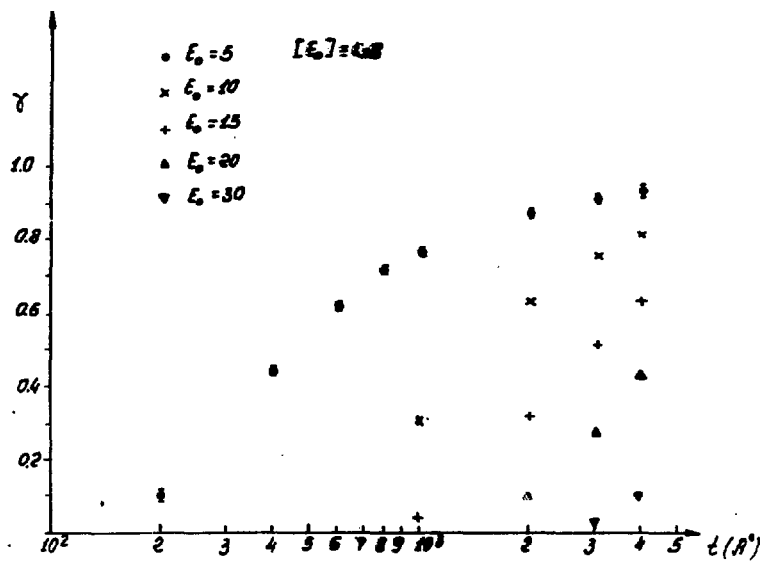


Рис.5 Коэффициенты поглощения электронов с энергией 5,10,15, 20 и 30 кэВ, в случае, когда они равномерно распределены по толщине конвертера и имеют случайное направление, в зависимости от его толщины.

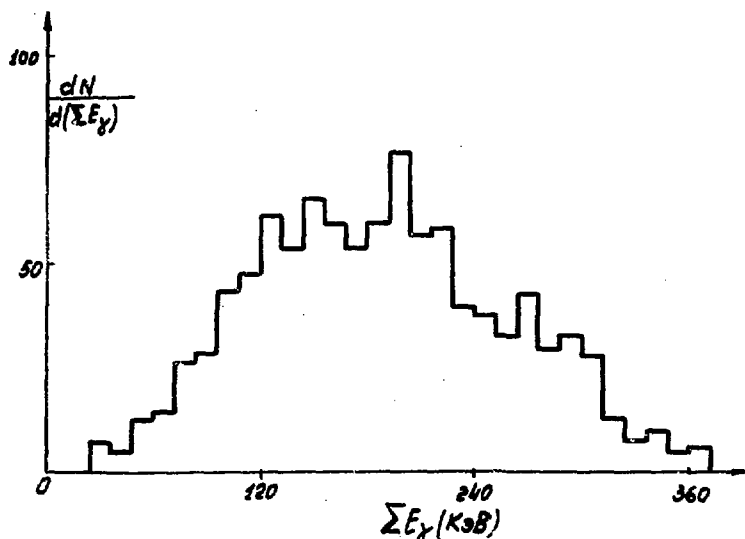


Рис.6 Распределение суммарной энергии квантов РПШ, вышедших из радиатора (1000 слоев майлара толщиной 25 мкм, расстояние между слоями 0.7 мм) при прохождении через него электронов с энергией 3.6 ГэВ.

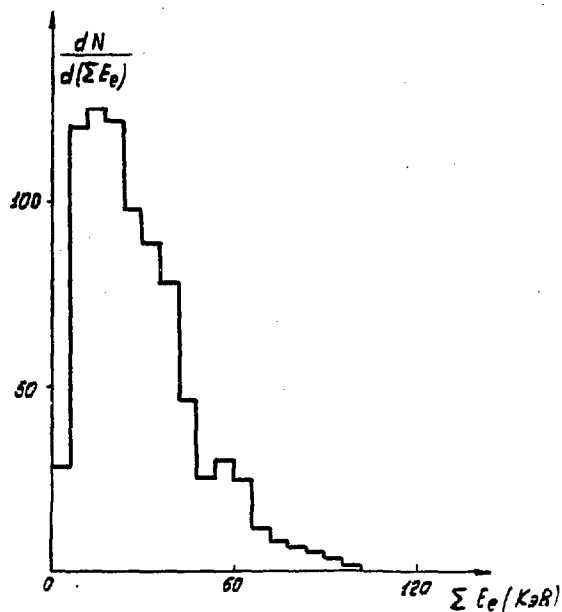


Рис.7 Распределение суммарной энергии фотоэлектронов, вышедших из конвертера толщиной 2000 \AA , расположенного под углом $\Theta = 1/20$ рад. к первичному пучку. Начальные условия остались без изменения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиханян А.И., Арутюнян Ф.А., Испирян К.А., Тер-Микаелин М.Л.
Об одной возможности детектирования заряженных частиц высоких энергий - ЖЭТФ, 1961, т.41, с.2002-2010.
2. Алиханян А.И. Обзор работ по рентгеновскому переходному излучению и детекторам на его основе, выполненных в Советском Союзе. Труды Международного симпозиума по переходному излучению частиц высоких энергий, Ереван, 12-17 мая, 1977 с.41-79.
3. Ispirian K.A., Knyazian S.B., Margarian A.T. Optimal Transition Radiation Detectors for π, K, P Identification at Momenta $P \geq 60$ GeV/c.
Труды Международного симпозиума по переходному излучению частиц высоких энергий, Ереван, 12-17 мая, 1977. с. 209-637.
4. Алиханян А.И., Пустоветов В.П., Трубкин Ю.А. и др. РИИ - детектор для измерения энергии и режекции частиц в области $\gamma = 10^3 + 10^4$. Труды Международного симпозиума по переходному излучению частиц высоких энергий, Ереван, 12-17 мая, 1977, с.619-637.
5. Ludlam T., Platner E., Polychronakos V. et al. Particle Identification by Electron Cluster Detection of Transition Radiation Photons. Nucl. Instr. & Meth. 180, N.2-3, 1981, p.413-418.;
Fabjan W., Willis W., Gavrilenko I. et al. Practical Prototype of a Cluster-Counting Transition Radiation Detector. Nucl. Instr. & Meth. vol. 185, N.1, 1981, p.119-124.

6. Астабатьян Р.А., Лорикян М.П., Манукян Г.А., Маргарян К.Ж.
О некоторых возможностях выделения локальной ионизации на фоне непрерывно распределенной ионизации в детекторах излучений, Препринт ЕФИ-425(32)-80, Ереван 1980.
7. Мюллер Д., Черри М.Л. Спектр и энергетическая зависимость рентгеновского переходного излучения. Труды международного симпозиума по переходному излучению частиц высоких энергий, Ереван, 12-17 мая, 1977, с. 137-144.
8. Вятский А.Я., Трунев В.В. Прохождение, отражение и поглощение электронов в тонких пленках твердого тела, Радиотехника и электроника, т.ХЛ, 1967, т.9 с.1636-1642.
9. Shimizu R., Ikuta T., Murata K. The Monte Carlo Technique as Applied the Fundamentals of EPMA and SEM, Journal of Applied Physics, vol.43, N.10, 1972, p.4233-4249.
10. Akkerman A.F., Chernov G.Y., Mean Free Paths by Inelastic Interactions, Stopping Powers and Energy Straggling for Electrons of Energies up to 20 KeV in Various Solids Phys Stat.Sol.(b), vol.89, N.1, 1978, p.329-333
11. Маргарян А.Т. Многократное рассеяние в тонких слоях вещества, Препринт ЕФИ-378(36)-79, Ереван 1979.
12. Зверев В.М., Испирян К.А., Маргарян А.Т. Монте-Карло расчет детектора рентгеновского переходного излучения на основе метода энерговыделения, Препринт ЕФИ-43(73), Ереван 1973.
13. Сторм Э., Израел Х. Сечения взаимодействия гамма излучения. М.: Атомиздат, 1973.

14. Bambynek W., Crasemann B., Fink R.W. et al. X-Ray Fluorescence Yields, Auger and Coster-Kronig Transition Probabilities, Rev.Mod.Phys., V.vol.44, N.4, 1972, p.716-813.
15. Giannini M., Oliva P., Ramorino M.C. Monte Carlo Calculation of the Energy Loss Spectra for Gamma Rays in Cylindrical $NaJ(Tl)$ Crystal RT/FI (69) 15, 1969
16. Ispirian K.A., Margarian A.T., Zverev A.M. A Monte Carlo Method for Calculation of the Distribution of Ionization Losses. Nucl.Instr.& Meth., vol.117, 1974, p.125-129
17. Gukasian S.M., Kavalov R.L., Lorikian M.P. Dielectric Particle Detector Under Pulsed Power Supply Nucl.Instr.& Meth., vol.171, N.3, 1980, p.469-472
18. H.Gebauer. Particle Identification by Measurement of the Spark Formation Time in a System Modified Spark Chamber Nucl.Instr. & Meth., vol.144, N.3, 1977, p.447-451.
Ананьин П.С., Гуштан М.Н., Стибунов В.Н., Работа искровой камеры в режиме ионизационных измерений. Вопросы атомной науки и техники, выпуск I/II, Харьков 1980, с 74-75

Рукопись поступила 8 декабря 1981 г.

Редактор Л.П.Мукаян
Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 048

ВЭ- 05071

Тираж 299

Препринт ВЭИ

Формат издания 60x84/16

Подписано к печати 15/II-82г.

1,0 уч.изд.л. ц. 7 к.

Издано Отделом научно-технической информации
Ереванского физического института, Ереван-36, пер.Маркаряна 2

индекс 3624