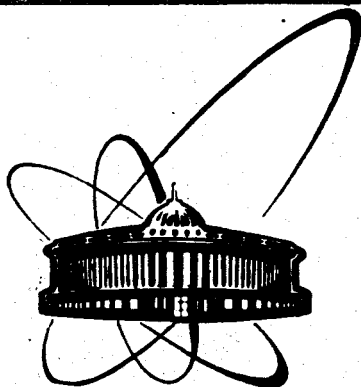


89-501



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

В 191

P13-89-501

С.Е.Васильев, Ю.В.Заневский, А.Б.Иванов,
Л.П.Смыков, Г.А.Черемухина

РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРА ИЗОБРАЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ПЗС-МАТРИЦЫ

Направлено в журнал "Приборы и техника
эксперимента"

1989

1. ВВЕДЕНИЕ

Попытки создания детекторов на основе ПЗС-матриц предпринимаются в различных исследовательских центрах /1-4/. Применение ПЗС-матриц дает возможность работать с очень интенсивными входными пучками, где традиционные координатные детекторы трудно использовать. Сочетание большого динамического диапазона с достаточно большим количеством элементов изображения позволяет разрабатывать позиционно-чувствительные детекторы для регистрации γ -квантов, нейтронов, α - и β -частиц.

Цель настоящей работы - создание позиционно-чувствительного детектора мягкого рентгеновского излучения на основе ПЗС-матрицы, исследование его основных характеристик.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 1 схематично показан общий вид детектора. Он состоит из люминофора, нанесенного на волоконно-оптическую шайбу, двух электронно-оптических преобразователей, объектива, ПЗС-матрицы, помещенной в криостате, электроники считывания и обработки информации, работающей на линии с ПК "Правец-16".

При поглощении рентгеновского кванта /или α -частицы/ в люминофоре образуется вспышка света с определенным спектральным составом и определенной длительностью. Часть квантов света попадает на волоконно-оптическую шайбу и далее на вход сборки из двух электронно-оптических преобразователей. Первый электронно-оптический преобразователь /ЭОП-1/ имеет электрическую фокусировку и коэффициент преобразования изображения 0,63, входной рабочий диаметр 40 мм, выходной - 26 мм. Усиленная световая вспышка передается на вход ЭОП-2, имеющего микроканальную пластину, и далее через объектив поступает на ПЗС-матрицу. ПЗС-матрица /244x144 элемента, с поверхностным каналом/ помещена в криостат, который позволяет менять температуру матрицы от комнатной до -100°C. Далее информация с помощью электроники считывания и обработки поступает в ПК "Правец".

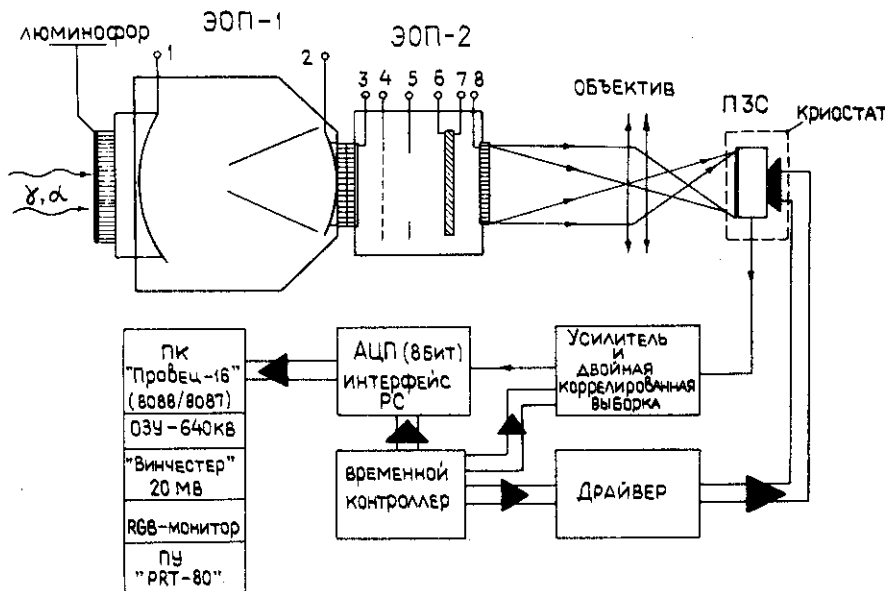


Рис. 1. Блок-схема детектора: 1, 2 - фотокатод и люминесцентный экран ЭОП-1, 3 - фотокатод /-2 кВ/, 4 - сетка /+0,5 кВ/, 5 - кольцо /-1,75 кВ/, 6 - /0 кВ/ и 7 - электроды микроканальной пластины, 8 - люминесцентный экран /+5,2 кВ/ ЭОП-2.

Электроника

Электроника выполняет следующие функции: управляет работой матрицы ПЗС, обрабатывает и кодирует информацию с матрицы, передает цифровой код в ЭВМ; конструктивно состоит из камеры и устройства оцифровки изображения, выполненного в стандарте КАМАК. В камере расположены ПЗС-матрица, электроника управления матрицей и усилитель. Устройство оцифровки изображения включает в себя "двойную коррелированную выборку", АЦП /8 разрядов/ и интерфейс связи с ЭВМ. Управление обеспечивается тактовым генератором и драйвером. Тактовый генератор /интегральная микросхема/ вырабатывает все необходимые сигналы для управления матрицей ПЗС в уровнях КМОП-логики.

Драйвер /интегральная микросхема/ преобразует сигналы с тактового генератора в 4-уровневые сигналы для управления секцией накопления и 2-уровневые для управления секцией хранения и выходным регистром.

Цикл /кадр/ работы ПЗС-матрицы состоит из двух частей. В первой части происходит накопление информации под одним из фазовых электродов секции накопления и последовательный поэлементный вывод информации из секции хранения через выходной регистр в выходное устройство матрицы.

Варьирование временем накопления осуществляется триггером запрета работы тактового генератора и внешним таймером, задающим время накопления. Минимальное время накопления, равное 0,4 с, определяется частотой работы выходного регистра /70 кГц/, выбранного из расчета максимально возможного уменьшения неэффективности переноса заряда из ячейки в ячейку. С той же целью используется оптический ввод "непустого нуля" на уровне 10% от максимального зарядового пакета.

Во второй части происходит передача зарядовых пакетов из секции накопления в секцию хранения. Перед вводом заряда каждого элемента в выходной преобразователь заряд-напряжение происходит сброс предыдущего зарядового пакета посредством МОП-ключа, расположенного, как и выходной преобразователь, на кристалле. Таким образом, на выходе матрицы получаем последовательность циклов /кадров/, каждый из которых содержит более $3,3 \cdot 10^4$ аналоговых сигналов.

Сигналы с основного и компенсационного выходов матрицы поступают на дифференциальный усилитель с регулируемым коэффициентом усиления /10-100/. Здесь происходит усиление сигнала и подавление тактовой помехи, "просачивающейся" через проходные емкости ключа сброса заряда в выходном устройстве матрицы. Усиленный и отфильтрованный сигнал подается на схему "двойной коррелированной выборки", причем, поскольку АЦП /1107ПВ2/ на входе имеет устройство выборки-хранения, схема содержит только ключ привязки к уровню "черного". Сигналы управления ДКВ поступают от тактового генератора. АЦП преобразует аналоговый сигнал /0-2 В/ в восьмиразрядный цифровой код.

Передача цифровых кодов в ПК "Правец" осуществляется асинхронно без буферной памяти по КЛД посредством карты адаптера /5/, расположенного в ПК, и интерфейса, конструктивно выполненного в стандарте КАМАК.

Программное обеспечение

Для обеспечения режима считывания кадра и графического представления информации разработано программное обеспечение. Оно выполняет следующие функции:

- считывание информационного кадра, а именно считывание цифровых кодов АЦП для одного кадра через интерфейс в оперативную память ПК в режиме прямого доступа к памяти;

- графическое представление кадра в виде двумерной гистограммы размером 234×144 канала;
- выбор X- или Y-сечений при помощи программно-управляемых маркеров и их представление в виде одномерных гистограмм;
- выбор одно- и двумерной зоны интереса на одномерной или двумерной гистограммах соответственно для одного информационного кадра и статистическая обработка зоны /вычисляются максимальное и минимальное число событий в канале и соответствующие им номера каналов, среднее число событий в канале, суммарное число событий в зоне интереса, среднеквадратичное отклонение числа событий от среднего, FWHM и центр тяжести для выраженного пика/;
- запись кадра на диск и чтение кадра с диска;
- многократное считывание и запись кадров на диск /число кадров задается пользователем/;
- вычисление среднего "темнового" кадра и запись его на диск;
- вычитание константы или "темнового" кадра из информационного кадра;
- статистическая обработка произвольной зоны интереса для заданного количества информационных кадров, записанных на диске. Вычисляются среднее число событий, среднеквадратичное отклонение числа событий от среднего /в процентах/, среднеквадратичное отклонение максимумов от среднего максимума /в процентах/, среднее суммарное число событий, среднеквадратичное отклонение интегралов от среднего интеграла /в процентах/;
- вычисление корректирующей матрицы коэффициентов с целью компенсации неоднородной чувствительности ЭОП по площади, запись полученной матрицы на диск;
- умножение информационного кадра на корректирующую матрицу;
- просмотр считанного информационного кадра;
- выбор цветовой палитры и цветовой шкалы кодирования информации.

3. ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве конвертора рентгеновского излучения в описываемом детекторе применялись люминофоры Gd_2O_2S-Tb , Y_2O_2S-Tb , $CdWO_4$. Основные параметры люминофоров приведены в таблице. Анализ показывает, что наиболее предпочтительным для регистрации мягких рентгеновских квантов является оксисульфид гадолиния, поскольку уже при толщине люминофора 40 мкм эффективность регистрации близка к единице /рис. 2/. К тому же он обладает достаточно большим энергетическим выходом η , а его спект-

Таблица

E_{γ}			6 кэВ	8 кэВ		
	$Z_{\text{эфф.}}$	ρ (г/см ³)	η (%)	μ/ρ (см ² /г)	μ/ρ (см ² /г)	τ (с)
Y ₂ O ₂ S-Tb	35	4,89	12	230	105	10E-3
Gd ₂ O ₂ S-Td	56,5	7,34	14-18	208,4	350	10E-3
CdWO ₄	63	7,9	4-6	329,5	157	

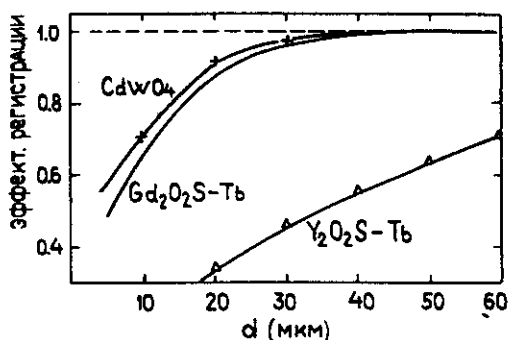


Рис. 2. Расчетные зависимости эффективности регистрации рентгеновских квантов с энергией 8 кэВ от толщины для различных люминофоров.

ральная характеристика неплохо согласуется со спектральной характеристикой фотокатода ЭОП-1 /S-25 либо S-20(R)/.

Однако при необходимости регистрации более жесткого рентгеновского излучения целесообразно использовать вольфрамат кадмия /рис. 3/. Разница в эффективности регистрации между CdWO₄ и Gd₂O₂S при сравнимых толщинах объясняется еще тем, что при изготовлении конвертора из поликристаллического люминофора плотность упаковки обычно около 0,4, т.е. нагрузка люминофора примерно в 2,5 раза меньше той, которая бы получалась при непосредственном умножении толщины люминофора на его плотность. В данной работе исследования проводились в основном с оксисульфидом иттрия, конверторы изготавливались методом осаждения люминофора на волоконно-оптическую шайбу из специально приготовленной суспензии; толщина конвертора около 50 мкм. Эффективность регистрации для рентгеновского излучения с энергией 6 кэВ составила величину порядка 86%, что хорошо согласуется с расчетным значением.

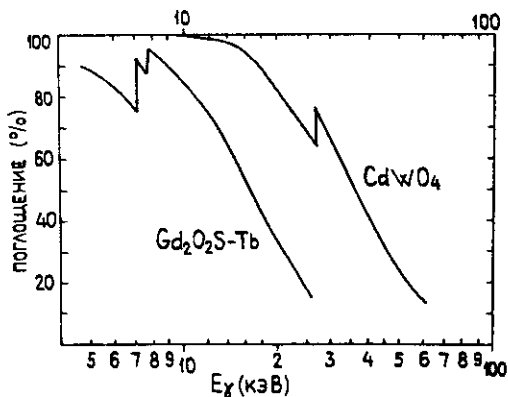
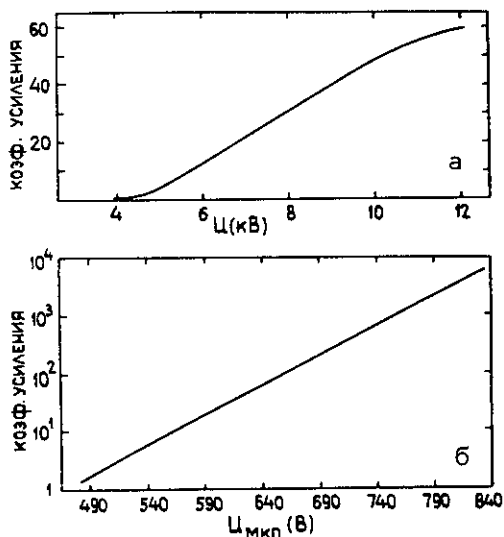


Рис. 3. Расчетные зависимости поглощения рентгеновских квантов в CdWO_4 и $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S-Tb}$ от энергии квантов. Толщина CdWO_4 50 мкм, $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S-Tb}$ 35 мкм.

Рис. 4. Зависимости коэффициентов усиления для ЭОП-1 /а/ и ЭОП-2 /б/: а - от напряжения на фотокатоде ЭОП-1, б - от напряжения на микроканальной пластине ЭОП-2. Длина волны источника света, с помощью которого измерялись коэффициенты усиления, равна 550 нм.



При конверсии рентгеновский квант /6 кэВ/ образует около 200 фотонов / $\lambda_{\text{max}} = 384 \text{ нм}$ /, из которых только меньше половины доходит до фотокатода ЭОП-1, коэффициент усиления которого зависит от напряжения, прикладываемого между фотокатодом и экраном /рис. 4а/. Стыковка двух преобразователей без уменьшения рабочей площади детектора возможна благодаря тому, что ЭОП-1 уменьшает размер изображения в 1,6 раза. Коэффициент усиления второго ЭОП существенно больше, чем у первого, за счет применения МКП в качестве электронного множителя /рис. 4б/. Необходимо отметить, что суммарный коэффициент усиления сборки из двух преобразователей в 4 раза меньше то-

го, который получился бы перемножением значений из рис. 4а и 4б. Коэффициент усиления первого ЭОП устанавливался равным 50, коэффициент усиления второго - менялся в зависимости от условий измерений.

Изображение, сформированное на выходном экране ЭОП-2, уменьшалось примерно в пять раз с помощью объектива PRACTICAR 1:2,8, $f = 20$ мм и фокусировалось на фоточувствительной части поверхности ПЗС-матрицы. Измерение потерь света показало, что до матрицы доходит только 0,6% от первоначального потока.

Для оценки собственных шумов и линейности сборки преобразователей выходной экран диафрагмировался до 2 мм, а вместо ПЗС-матрицы устанавливался фотоэлектронный умножитель /ФЭУ-87/ со схемой счета фотонов. Мертвое время схемы 40 нс. Интенсивность светового потока при суммарном коэффициенте усиления $75 \cdot 10^3$ составила величину $2,5 \cdot 10^4$ фотонов в сек., что соответствует $6 \cdot 10^{-12}$ лм для $\lambda = 550$ нм. При измерении линейности использовался коллимированный рентгеновский пучок /8 кэВ/, мониторингирование проводилось с помощью газового детектора. Отступление от линейности при увеличении интенсивности рентгеновского пучка /рис. 5/ происходит вследствие того, что не удается обеспечить постоянство спектрального состава рентгеновского пучка во всем диапазоне интенсивностей.

Для исследования зависимости уровня шумов матрицы от температуры был разработан криостат. ПЗС-матрица размещалась внутри криостата на охлаждаемом радиаторе. Охлаждение осуществлялось продувкой паров жидкого азота через радиатор. В качестве термометра использовалось отградуированное сопротивление ТВО, наклеенное на радиатор. Конструкция криостата позволяла менять температуру ПЗС-матрицы от комнатной до -100°C .

Шумы определялись как среднеквадратичное отклонение от среднего значения содержимого выбранной ячейки /в каналах АЦП/. Как сле-

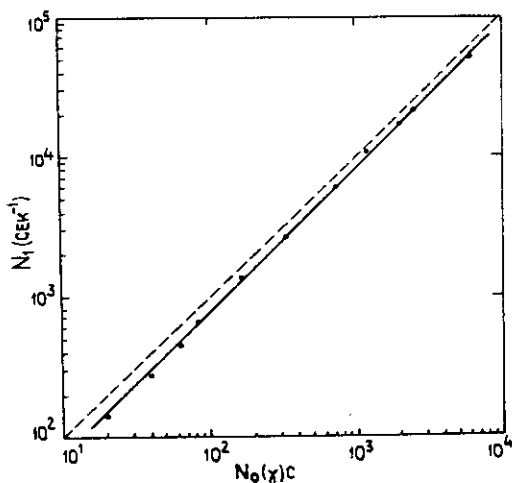


Рис. 5. Зависимость интенсивности счета схемы счета фотонов от интенсивности рентгеновского пучка /8 кэВ/, падающего на люминофор детектора. Диаметр рентгеновского пучка 200 мкм.

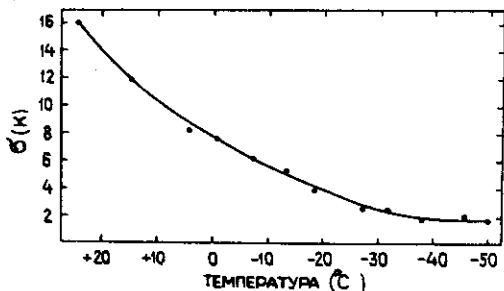
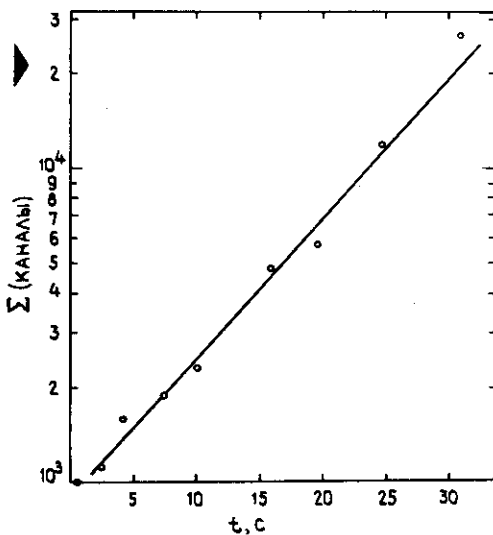


Рис. 6. Зависимость сред-
неквадратичного отклоне-
ния от среднего содержимо-
го в выбранной ячейке ПЭС-
матрицы /в каналах АЦП/ от
температуры радиатора кри-
остата.

Рис. 7. Зависимость суммы
содержимого 121 ячейки ПЭС-
матрицы /в каналах АЦП/ от
времени накопления.



дует из рис. 6, они доста-
точно сильно зависят от тем-
пературы матрицы и уже при
-35÷-40°C шумы определяются
только шумами электроники
считывания и кодирования -
это ~2 канала АЦП. Зная ко-
эффициент усиления /около
100/ и коэффициент преоб-
разования заряда в напряже-
ние в выходном устройстве

матрицы / $2,5 \cdot 10^4$ электрон/мВ/, можно определить соответствие
между каналом АЦП и зарядом /в электронах/. В нашем случае
один канал АЦП соответствует примерно $2 \cdot 10^3$ электронов. Если
определить динамический диапазон матрицы /D/ как отношение
максимального зарядового пакета в ячейке к утроенному уровню
шумов, то:

$$D = 5 \cdot 10^6 / 3\sigma = 4 \cdot 10^2$$

и определяется только шумами считывания.

Результаты измерения зависимости шумового заряда от време-
ни экспозиции при нормальной температуре приведены на рис. 7.
По оси ординат отложена сумма содержимого 121 канала. К при-
меру, при времени выдержки 30 с среднее значение шумового за-
ряда /в каналах АЦП/ равно 230, что соответствует плотности

темнового тока ПЗС-матрицы $1,2 \text{ нА/см}^2$. При времени экспозиции $0,4 \text{ с}$ из-за больших шумов считывания вкладом шумов матрицы можно пренебречь, т.е. при короткой выдержке можно работать и без охлаждения.

Важной характеристикой детектора является чувствительность к мягкому рентгеновскому излучению, т.е. какому количеству электронов в ПЗС-матрице соответствует один квант, поглощенный в люминофоре. Измерение чувствительности производилось при помощи коллимированного рентгеновского пучка $/E = 8 \text{ кэВ}$, диаметр коллиматора - 200 мкм /, интенсивность которого лежала в диапазоне от 100 до 3000 1/с . По суммарному заряду в матрице, соответствующему данной интенсивности пучка, определялась чувствительность. При общем коэффициенте усиления преобразователей около $75 \cdot 10^3$ она составила величину, равную примерно 1300 электронов или $0,55\text{-}0,6$ канала АЦП. Аналогичные измерения с α -частицами дали значение чувствительности 120 каналов АЦП на одну α -частицу с энергией $5,5 \text{ МэВ}$.

В процессе исследования было определено, что для уменьшения потерь информационного заряда ПЗС-матрицы необходим ввод "непустого нуля", величина которого составляла примерно 5% от полного заряда в ячейке. Фоновый заряд вводился оптическим образом, т.е. матрица подсвечивалась световым потоком определенной интенсивности. "Темновой" кадр запоминался и затем вычитался из "информационного" кадра.

Однородность чувствительности детектора по площади исследовалась при облучении люминофора равномерным пучком от рентгеновской трубки $/\sim 8 \text{ кэВ}/$.

Весьма большой разброс чувствительности по краям и в центре обусловлен в основном качеством изготовления электронно-оптических преобразователей. Для компенсации разброса применялась процедура умножения информационного кадра на матрицу поправочных коэффициентов; матрица формировалась один раз перед началом измерений и хранилась на диске. На рис. 8 показаны результаты применения корректирующей матрицы: среднеквадратичное отклонение при суммировании 30 строк не превышает одного процента.

Пространственное разрешение детектора как для рентгеновского излучения $/\sim 8 \text{ кэВ}/$, так и для α -частиц составило величину порядка 350 мкм при рабочем диаметре люминофора 40 мм и определялось в основном ПЗС-матрицей. На рис. 9 показан профиль изображения от ряда круглых отверстий, полученного при равномерной засветке пучком рентгеновских гамма-квантов. Интенсивность пучка выбиралась такой, чтобы высота пика была примерно в десять раз выше уровня шумов для более показательной демонстрации влияния температуры на качество изображения.

Рис. 8. Сечения изображения, получаемого при равномерной засветке детектора потоком рентгеновских квантов до /вверху/ и после коррекции /внизу/.

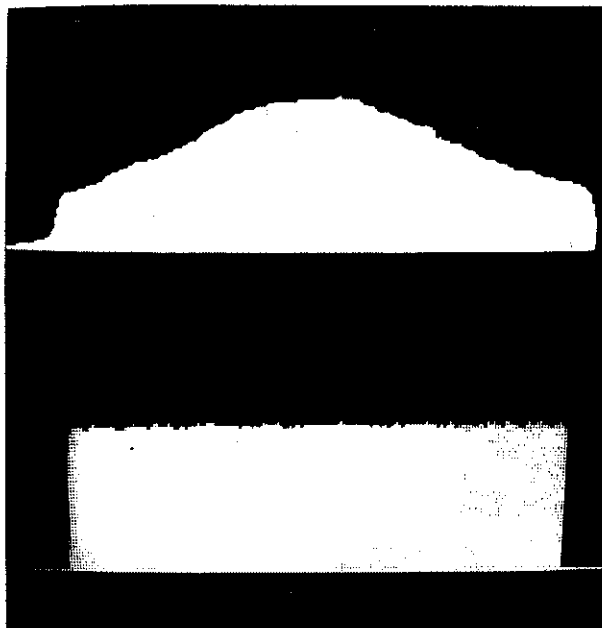
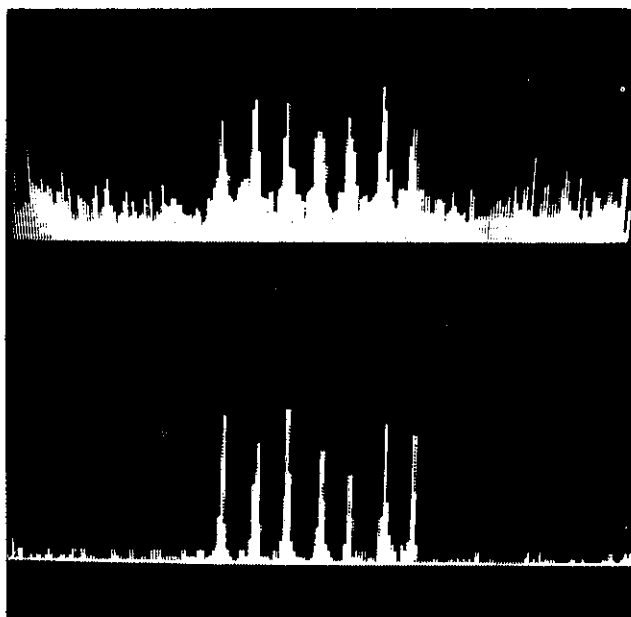


Рис. 9. Сечение изображения, полученного при облучении рентгеновским пучком маски с отверстиями диаметром 0,5 мм при 24°C /вверху/ и -35°C /внизу/. Расстояние между отверстиями 2 мм.



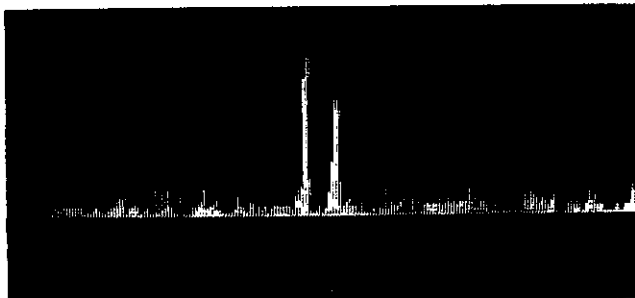


Рис. 10. Сечение изображения, полученного от 2 α -частиц, при температуре ПЗС-матрицы - 35°C. Высота наибольшего пика - 27 каналов АЦП.

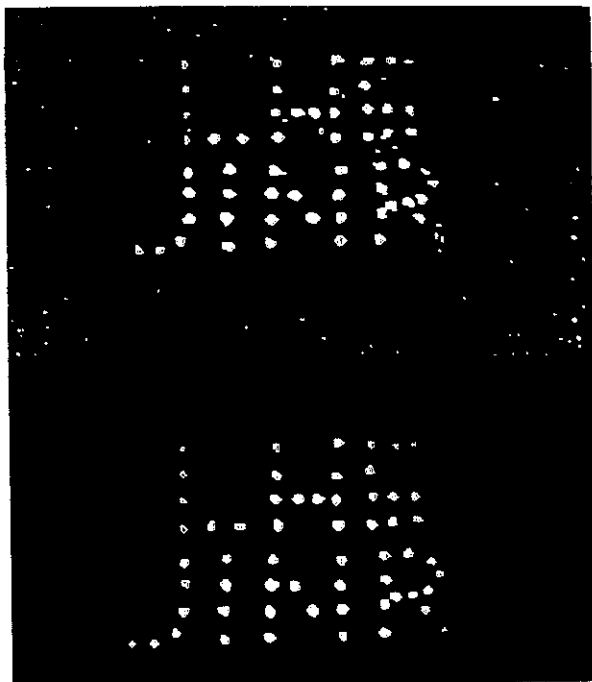


Рис. 11. Изображение букв, составленных из отверстий диаметром 0,7 мм без охлаждения /вверху/ и с охлаждением /внизу/. Энергия пучка рентгеновских квантов 8 кэВ. Диаметр отверстий 0,8 мм.



Рис. 12. Сечение изображения "серого клина". Энергия пучка рентгеновских квантов 8 кэВ. Толщина каждой полоски клина из майла - 80 мкм.

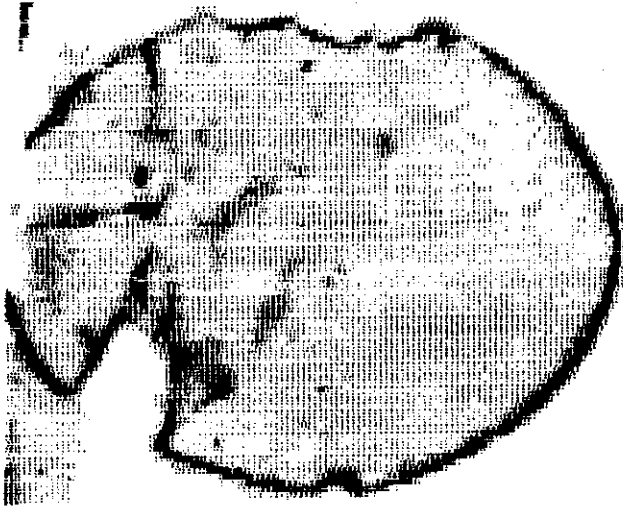


Рис. 13. Изображение, полученное от кристалла CdWO_4 , облучаемого пучком мягких рентгеновских квантов. Максимальный размер кристалла примерно 15 мм, толщина кристалла ~ 40 мкм. Темные области соответствуют дефектам в кристалле.

На рис. 10 показано изображение от двух α -частиц, зарегистрированных с интервалом ~ 2 с. Высота пика для каждой частицы примерно в 5 раз меньше полного интеграла под пиком. В качестве иллюстрации работы детектора приведены 3 фотографии с экрана монитора /рис. 11-13/.

4. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы был создан позиционно-чувствительный детектор на основе ПЗС-матрицы с поверхностным каналом на линии с ПК "Правец" и исследованы его основные характеристики.

Применение двух электронно-оптических преобразователей позволило получить довольно высокий коэффициент преобразования для рентгеновских квантов с энергией 8 кэВ - 1300 электронов в ПЗС-матрице на один квант, поглощенный в люминофоре. Высокая чувствительность детектора позволяет регистрировать единичные α -частицы с энергией 5,5 МэВ.

Пространственное разрешение детектора при рабочем диаметре люминофора 40 мм составило величину около 350 мкм как для рентгеновских квантов, так и для α -частиц.

Однородность чувствительности по площади детектора с применением корректирующей матрицы весьма высока. Неоднородность эффективности регистрации не превышает одного процента.

Охлаждение ПЗС-матрицы до температур $-35 \div -40^{\circ}\text{C}$ позволяет существенно увеличить время накопления без увеличения уровня шумов.

Созданный детектор может применяться для системы диагностики пучков, структурных исследований белков с помощью синхронного излучения, для съема информации со сцинтилляционных нитей в годоскопах и т.д.

В заключение авторы выражают признательность академику А.М.Балдину за внимание и интерес к работе. Авторы благодарят В.А.Белякова, Н.П.Волкова, М.Н.Михайлову, А.Е.Московского, В.Д.Пешехонова, Н.Н.Тиханчева, Ю.Г.Федулова, В.И.Дацкова за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Собельман И.И. и др. - Препринт ФИАН, М., 1988, 241.
2. Strauss M.G. et al. - NIM, 1988, A266, p.563.
3. Callcot T.A. et al. - NIM, 1988, A266, p.578.
4. Говорун В.Н. и др. - Препринт ИФВЭ 83-136, Серпухов, 1983.
5. Иванов А.Б., Чунг Ф.Х. - ОИЯИ, 13-87-618, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 июня 1989 года.