



Б.28

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

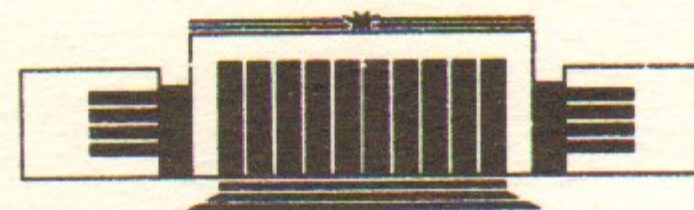
2

А.М. Батраков, Э.А. Купер, А.П. Лысенко,  
В.Е. Панченко, М.Г. Федотов

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО ПЗС  
В КАЧЕСТВЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ДЕТЕКТОРА

БИБЛИОТЕКА  
Института ядерной  
физики СО АН СССР  
ИНВ. № \_\_\_\_\_

ПРЕПРИНТ 86-119



НОВОСИБИРСК

1986

В настоящее время все больший интерес в качестве детекторов рентгеновских изображений вызывают приборы с зарядовой связью (ПЗС). В частности, это обусловлено значительным снижением их стоимости и улучшением качества серийных образцов.

Работы, посвященные использованию ПЗС в системах регистрации рентгеновских изображений, позволяют выделить три основные схемы.

Во-первых, это использование ПЗС совместно с рентгеновским электронно-оптическим преобразователем (РЭОП) ([1]).

Во-вторых, использование глубоко охлаждаемого ПЗС в качестве отображающего рентгеновского спектрометра, позволяющего получать «цветное» изображение ([2] — [4]).

В-третьих, использование ПЗС в качестве интегрирующего детектора с накоплением зарядов множественных событий в его ячейках ([5]—[7]).

Для рентгеновских установок с невысокой яркостью наиболее привлекательными выглядят две первые схемы, позволяющие работать в режиме счета отдельных фотонов, а во второй схеме и обеспечивать их спектрометрию.

Однако обе эти схемы плохо подходят для регистрации быстро изменяющихся рентгеновских изображений в пучках излучения высокой интенсивности (например, СИ). Для первой схемы ограничения накладываются свойствами РЭОП (низкая перегрузочная способность и послесвечение люминофора). Для второй — необходимостью очень коротких времен накопления и, соответственно, многократного считывания для набора статистики, а также значитель-

ного понижения рабочих частот (из-за роста сопротивления поликремниевых электродных структур при глубоком охлаждении и из-за жестких требований к уровню шумов электроники считывания). В этих условиях наиболее подходящей является, по-видимому, третья схема. Особый интерес она представляет в связи с возможностью создания на основе серийных ПЗС-матриц с переносом кадра систем регистрации быстрого одномерного рентгеновского кино, позволяющих снимать 300—700 одномерных изображений с временем на одно изображение порядка  $0,1 \div 1$  мкс (для приборов с поверхностным каналом) и  $10 \div 100$  нс (для приборов с углубленным каналом).

Настоящая работа является продолжением работ [5] и [7]. Как и в [7], здесь для оценки геометрического разрешения линейного ПЗС с поверхностным каналом использовалась рентгенодифракционная однокристалльная схема формирования тестовых объектов—разнесенных в пространстве рентгеновских линий (проекций линейного фокуса рентгеновской трубки).

Геометрическое разрешение ПЗС представляет наибольший интерес именно в режиме интегрирования изображения, поскольку в случае использования РЭОП ПЗС регистрирует оптическое излучение и его собственное разрешение ухудшается только свойствами РЭОП и сопряжения РЭОП—ПЗС. В случае отображающего спектрометра геометрическое разрешение фактически также определяется размерами элементов ПЗС из-за необходимости отбраковки многоячеечных событий.

Разрешение ПЗС в режиме интегрирования при регистрации рентгеновского излучения может ухудшаться по сравнению с разрешением в оптической области по двум причинам.

Поглощение рентгеновского излучения происходит не только в обедненной области селективно освещенной ячейки (где электрическое поле достаточно велико и сбор фотогенерированных зарядов полагается обычно полным), но и под обедненной областью, в электрически нейтральной части подложки. При этом заряды, образовавшиеся на расстоянии порядка диффузионной длины (и менее) от обедненной области выделенной ячейки, частично в результате диффузии попадают как в нее, так и в обедненные области соседних ячеек.

К сожалению, для большинства типов оптических ПЗС диффузионная длина не нормируется и может составлять от 10 до 100 мкм в зависимости от технологии и качества исходного материала.

Кроме того, при фотопоглощении рентгеновского кванта в обедненной области фотоэлектрон может достичь обедненной области соседней ячейки. Однако вклад этого эффекта сравнительно мал для фотонов с энергией менее 10 кэВ (рис. 1).

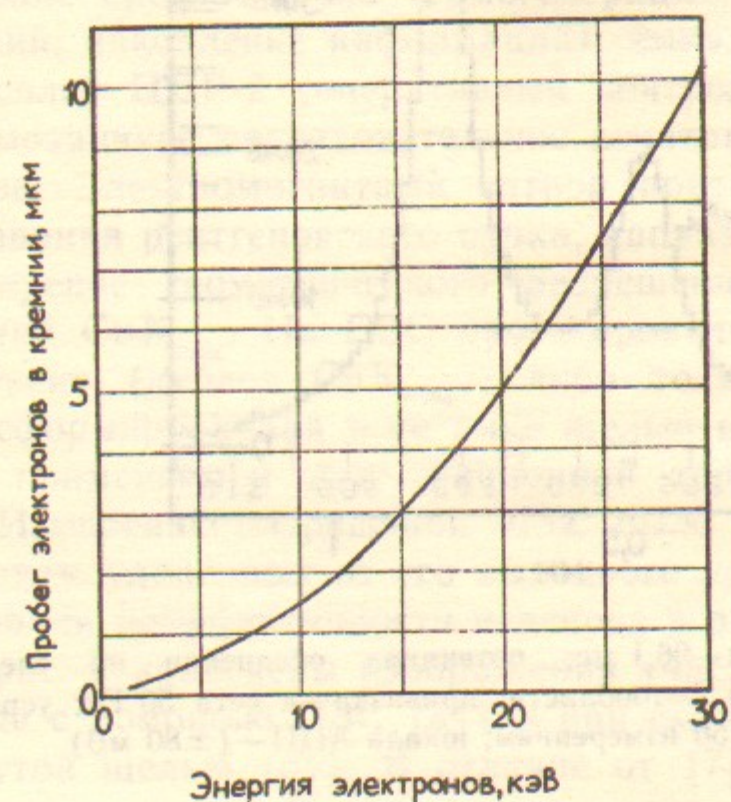


Рис. 1.

Здесь геометрическое разрешение ПЗС в режиме интегрирования фотогенерированных рентгеновским излучением зарядов измеряется более детально. Измерения сделаны для линейного формирователя видеосигнала (ЛФВС) типа 1200ЦЛ1 ([8]), аналогичного использовавшемуся в работах [5] и [7], представляющего собой серийный кремниевый ПЗС с поверхностным каналом, поликремниевой системой электродов и подложкой *n*-типа. Оптическое окно и пластмассовая бленда были удалены, а на их место была приклеена защитная бериллиевая фольга толщиной 100 мкм. Накопление зарядов в таком приборе может производиться как в фоточувствительной области, содержащей 1024 ячейки с размерами  $15 \text{ мкм} \times 15 \text{ мкм}$ , так и в сдвиговом регистре с размерами ячейки  $15 \text{ мкм} \times 90 \text{ мкм}$ .

ЛФВС функционирует в составе устройства для измерения одномерных изображений; оцифровка сигнала производилась АЦП-101S. И устройство измерения, и АЦП, выполненные в стандарте КАМАК, разработаны в ИЯФ СО АН СССР. Сигнал устройства измерения выводится на осциллограф для предваритель-

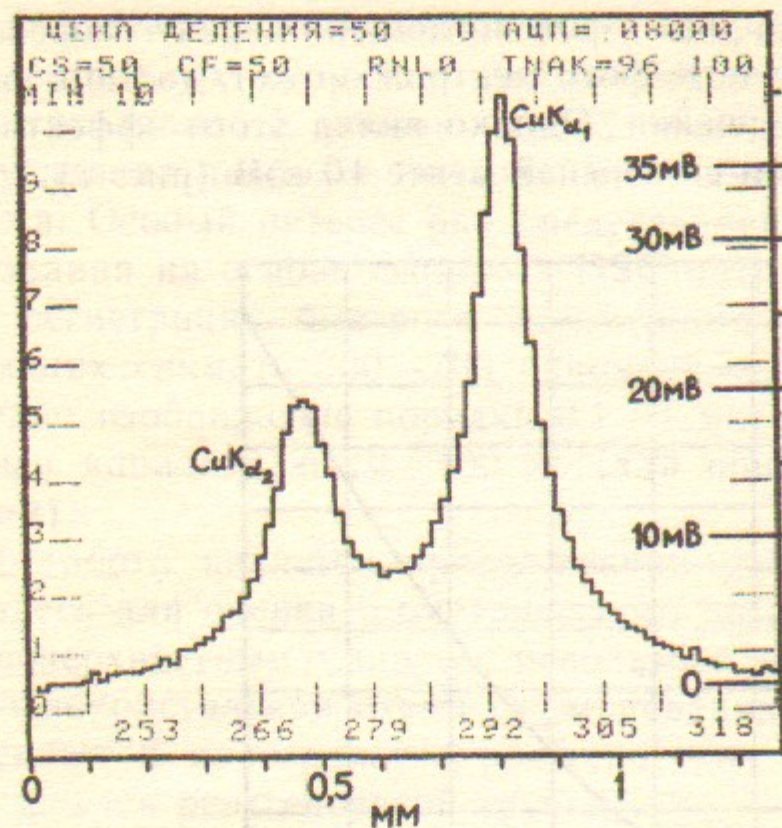


Рис. 2,а. Время накопления—96,1 мс; потенциал обеднения на электродах ПЗС—(-15 В); накопление—в фотообласти; привязка—к сети 50 Гц; усреднения сигнала и фона—по 50 измерениям; шкала АЦП—(±80 мВ).

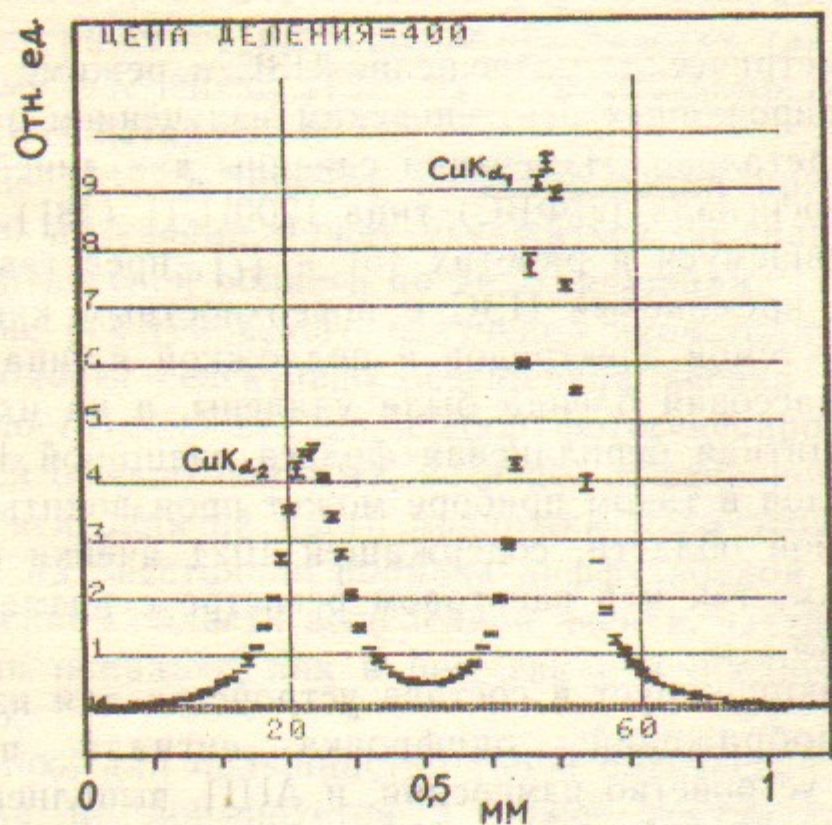


Рис. 2,б.

ной настройки системы и в цифровом виде—по последовательной системе связи—в микро-ЭВМ «Электроника-60», которая осуществляет управление режимом работы ПЗС и электромагнитным затвором и обеспечивает предварительную обработку информации (вычитание профиля тока термогенерации, усреднение нескольких измерений, накопление информации), вывод ее на цветной растровый дисплей ЦДР-2 (оперативный контроль) и вывод на графическое мозаичное последовательное печатающее устройство в виде графиков. Электромагнитный затвор предназначен для быстрого перекрытия рентгеновского пучка, направленного на ПЗС.

Измерение геометрического разрешения ЛФВС выполнялось для линий  $\text{CuK}_{\alpha_1, \alpha_2}$ . На ПЗС проектировались либо полный тестовый объект (дублет  $\text{CuK}_{\alpha_1, \alpha_2}$ ), либо только узкая часть линии  $\text{CuK}_{\alpha_1}$ , сформированная в ее пике щелью шириной 10 мкм, аналогичной применяемой для секционной топографии на СИ ([9], [10]). Измерение разрешения ПЗС было выполнено на ячейках, не слишком удаленных от его выходного устройства, для исключения влияния неэффективности переноса в регистре на разрешение.

На рис. 2 приведены изображения участка спектра  $\text{CuK}_{\alpha_1, \alpha_2}$ , полученные с помощью ПЗС (а) и при сканировании этого участка упомянутой щелью (б). В отличие от [7], здесь использовалось дифрагирование по Брэггу на совершенном кристалле кремния (отражение (111)), что позволило получить более узкие изображения линий.

Сигнал, полученный с ПЗС при освещении рентгеновским пучком шириной 10 мкм отдельной ячейки, показан на рис. 3. Видно, что сигналы в прилегающих ячейках составляют около 40% сигнала выделенной, что соответствует полной ширине на половине высоты менее 30 мкм. Отсюда следует, что вклад в чувствительность данного прибора поглощения рентгеновского излучения в обедненной области является относительно небольшим. Это предполагалось и по результатам измерения рентгеночувствительности ПЗС ([7]), которая оказалась значительно выше, чем следовало ожидать в предположении, что глубина обедненного слоя равна примерно 3 мкм.

Проведенные измерения показывают, что разрешение доступных оптических ПЗС при использовании их в режиме формирования рентгеновского изображения определяется диффузионной длиной в готовых кристаллах, что, в свою очередь, зависит от технологии изготовления соответствующего ПЗС.

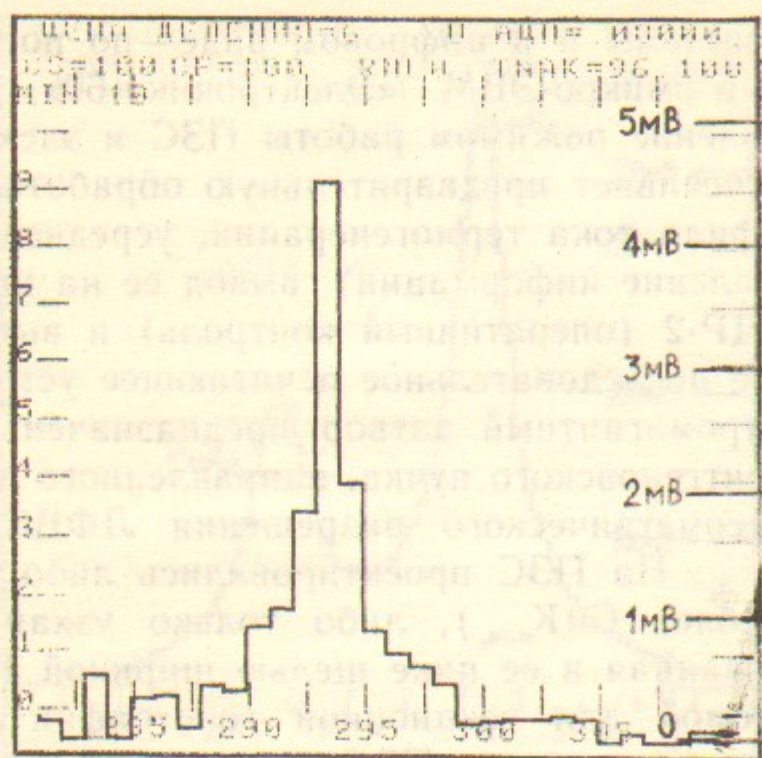


Рис. 3. Шаг гистограммы—ячейка ПЗС; время накопления—96,1 мс; потенциал обеднения на электродах ПЗС—(-15 В); накопление—в фотообласти; привязка—к сети 50 Гц; усреднения сигнала и фона—по 100 измерениям; шкала АЦП—( $\pm 80$  мВ).

Определенные преимущества по разрешению могут иметь приборы, изготовленные в тонком эпитаксиальном слое, выращенном на сильно легированной подложке. При этом область сбора зарядов ограничивается толщиной эпитаксиального слоя ([3], [4]).

Разрешение ПЗС может быть улучшено также путем создания глубокой обедненной области. Например, в работе [6] использовался специально изготовленный ЛФВС с высокоомной подложкой. Кроме того, увеличить глубину обедненного слоя можно, увеличив потенциал обеднения на электродах ПЗС. Наиболее интересным при этом представляется достижение режима лавинного усиления заряда в освещаемой ячейке, что, возможно, позволит регистрировать одиночные рентгеновские фотоны неохлаждаемым (теплым) ПЗС. Привлекательным такой режим может оказаться для систем со строчным накоплением изображения как обеспечивающий максимальную чувствительность и максимальную квантовую эффективность при сохранении высокого быстродействия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. R.L. Dalglisch, V.J. James, G. Tubbenhauer. Nucl. Instr. and Meth. 227, 521 (1984).
2. R.C. Catura, R.C. Smithson. Rev. Sci. Instr. 50, 219 (1979).
3. R. Bailey, C.J.S. Damerell, R.L. English, A.R. Gillman, A.L. Lintern, S.J. Watts, F.J. Wickens. Rutherford Appleton Laboratory RL-82-120 (Oxford, December 1982).
4. R.A. Stern, K. Liewer, J.R. Janesick. Rev. Sci. Instrum. 54(2), 198 (1983).
5. М.Г. Федотов. Дипломная работа НГУ—ИЯФ СО АН СССР (Новосибирск, 1981).
6. M.C. Peckerar, D.H. McCann, L. Yu. Appl. Phys. Lett. 39(1), 55 (1981).
7. M.G. Fedotov, E.A. Kuper, V.N. Litvinenko, V.E. Panchenko, V.A. Ushakov. Nucl. Instr. and Meth. 208, 427 (1983).
8. И.Д. Кашлаков, В.Т. Кленов, Е.В. Костюков. Электронная промышленность 7(113), 7 (1982).
9. И. Куб, В.Е. Панченко, М. Полцарова. Препринт 85-108 ИЯФ СО АН СССР (Новосибирск, 1985); ЖТФ (в печ.).
10. А.А. Васенков, Г.Н. Кулипанов, Ю.М. Литвинов, С.Н. Мазуренко, Н.Ф. Муссенко, В.Е. Панченко. Письма в ЖТФ, 11, 1196 (1985).

*А.М. Батраков, Э.А. Купер, А.П. Лысенко,  
В.Е. Панченко, М.Г. Федотов*

**Геометрическое разрешение линейного ПЗС  
в качестве рентгеновского детектора**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

---

Работа поступила 20 мая 1986 г.  
Подписано в печать 20.08.1986 г. МН 11795  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0,8 печ.л., 0,7 уч.-изд.л.  
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 119

---

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-  
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и  
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики  
СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*