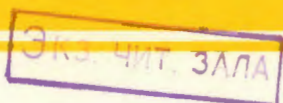


ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



10430

P13 - 10430

А.М.Зубарева, С.Илиев, В.Ф.Кушнирук, А.В.Рыхлюк,
В.Г.Субботин, Ю.П.Харитонов

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ
СПЕКТРОМЕТР СО СВЕТОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

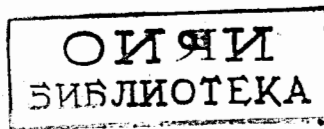
1977

P13 - 10430

А.М.Зубарева, С.Илиев, В.Ф.Кушнирук, А.В.Рыхлюк,
В.Г.Субботин, Ю.П.Харитонов

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ
СПЕКТРОМЕТР СО СВЕТОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Направлено в ПТЭ



Зубарева А.М. и др.

P13 - 10430

Полупроводниковый рентгеновский спектрометр со световой обратной связью

Изготовлен рентгеновский спектрометр с импульсной световой обратной связью в предусилителе. Получено разрешение 168 эВ на линии 5,9 кэВ. Дается анализ вклада в разрешение электроники и детектора.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Zubareva A.M. et al.

P13 - 10430

Semiconductor X-Ray Spectrometer with the Light Feedback

An X-ray spectrometer with the pulse light feedback in the preamplifier has been designed. The resolution has been obtained to be 168 eV on line of 5.9 keV. The analysis of the contribution to the electronics and detector resolution has been performed.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

В спектрометрах рентгеновского излучения, работающих с детекторами малой емкости и использующих гальваническую связь детектора с предусилителем, предельную точность измерения энергии ограничивают шумы канала полевого транзистора, резистора обратной связи, тока затвора полевого транзистора и тока утечки детектора. Ток утечки кремниевых дрейфовых детекторов высокого качества составляет при оптимальных условиях их работы 10^{-14} - 10^{-13} А. Величина тока затвора полевого транзистора - того же порядка. Такие токи позволяют увеличивать постоянную времени формирования сигнала в основном усилителе до $\tau_{\Phi} = 8-16$ мкс, в надежде уменьшить последовательный белый тепловой шум канала полевого транзистора. Шумовой вклад, обусловленный током, при этом не превышает 25 - 35 эВ для $\tau_{\Phi} = 8$ мкс. Оценка сделана для формирования сигнала, которое заключается в однократном дифференцировании и двойном интегрировании каскадами усилителя УСТ-3/1. Тепловой шум канала /последовательный белый шум/ для названного формирования выражается соотношением:

$$\Delta E_{\text{пос.б}} [\text{эВ}] = 0,28 \cdot 10^{-3} C_{\text{вх.}} \sqrt{\frac{TR_{\text{пос.}}}{\tau_{\Phi}}}, \quad /1/$$

где $C_{\text{вх.}}$ - полная входная емкость в пФ; T - температура кристалла полевого транзистора в град.К; $R_{\text{пос.}}$ - эквивалентное последовательное сопротивление, отображающее тепловой шум канала в Ом; τ_{Φ} - постоянная времени формирования в мкс. Тепловой шум канала составляет 80-90 эВ, если $C_{\text{вх.}} = 5$ пФ, $T = 150$ К, $\tau_{\Phi} = 8$ мкс, $S R_{\text{пос.}} = 1$ и крутизна полевого транзистора $S = 6$ мА/В.

Параллельный шум типа $1/f$, обусловленный избыточным шумом резисторов и изоляционных материалов входной цепи /2,7/, можно выразить так:

$$\Delta E_{\text{пар.}1/f} [\text{эВ}] = 0,114 \sqrt{\frac{T_{\text{рез.}}}{fR}}, \quad /2/$$

где R /ГОм/ - активная составляющая резистора на частоте f /кГц/; $T_{\text{рез.}}$ [К] - температура резистора. Значение коэффициента 0,114 перед корнем рассчитано для однократного дифференцирования и интегрирования в усилителе УСТ-3. Величина этого коэффициента слабо зависит от типа формирования, поэтому можно принять то же значение и для двойного интегрирования. Из /1/ и /2/ определим активную составляющую резистора, которая вызывает шум, равный последовательному тепловому шуму канала:

$$R [\text{ГОм}] = 1,22 \cdot 10^5 \frac{\tau_{\text{ф}}}{C_{\text{вх.}}^2 R_{\text{пос.}} f} \frac{T_{\text{рез.}}}{T_{\text{п.гр.}}}, \quad /3/$$

где все величины выражены в тех же единицах, что и в /1/ и /2/. Рассчитанная по /3/ величина R составляет 23 ГОм, если $C_{\text{вх.}} = 5$ пФ, $R_{\text{пос.}} = 170$ Ом, $f = 10$ кГц, $\tau_{\text{ф}} = 8$ мкс. Чтобы пренебречь избыточным шумом высокоомного резистора, этот шум не должен превышать 20% от теплового шума канала. Для приведенного выше примера, отображающего реальное значение параметров спектрометра высокого разрешения, активная составляющая резистора на частоте 10 кГц не должна превышать 500 ГОм. Номинал угольного резистора /типа КВМ/ на постоянном токе должен составлять при этом $n \cdot 10^{12} - 10^{13}$ /Ом. Работать с такими резисторами в обратной связи предусилителей было бы невозможно из-за сильного изменения по постоянному току режима выходных каскадов при увеличении интенсивности регистрируемого излучения. Более того, угольных сопротивлений с такими номиналами не существует, так как эти сопротивления свойственны изоляционным материалам. Понятно, что поведение материалов, которые изолируют выводы полевых транзисторов, подобно поведению высокоомных сопротивлений. Поэтому актив-

ная составляющая проводимости таких материалов тоже должна быть малой, в диапазоне от единиц до десятков килогерц.

Для исключения резистора обратной связи были предложены разные способы построения схем предусилителей: схема со световой обратной связью, действующей непрерывно /3,4/, схема с импульсной световой связью /5,6/ и, наконец, схема с обратной связью в сток /7/. Эта последняя использует увеличение тока затвора полевого транзистора с повышением напряжения в стоке. Обычно для первого усиливающего элемента предусилителя выбирают определенный исходный режим работы, обеспечивающий минимум шума. Принцип же, положенный в основу работы схемы с обратной связью в сток, противоречит этому правилу.

Увеличение интенсивности излучения с 10 до 10^4 Гц увеличивает ток затвора полевого транзистора на несколько порядков, если энергия рентгеновского излучения ≥ 10 кэВ. Такое увеличение тока затвора по сравнению с исходным током вводит дополнительный источник шума, связанный с процессами ударной ионизации электронно-дырочных пар в обедненной области транзистора, примыкающей к стоку /7/.

Кроме того, при исследовании схемы с обратной связью в сток нами было замечено увеличение шума полевого транзистора, когда напряжение в стоке соответствует стадии развития процесса ударной ионизации, то есть начальному участку крутого изменения тока затвора /рис. 1/. Кривая на этом рисунке получена для $\tau_{\text{ф}} = 1$ мкс. Малое значение $\tau_{\text{ф}}$ обеспечивает незначительный вклад в общий шум транзистора компоненты дробового шума тока затвора, которая могла бы маскировать появление избыточного шума.

Схема предусилителя с импульсной световой обратной связью, предложенная в работе /5/, свободна от недостатков, отмеченных выше. Подробное ее описание содержится в работах /6,8/.

ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ

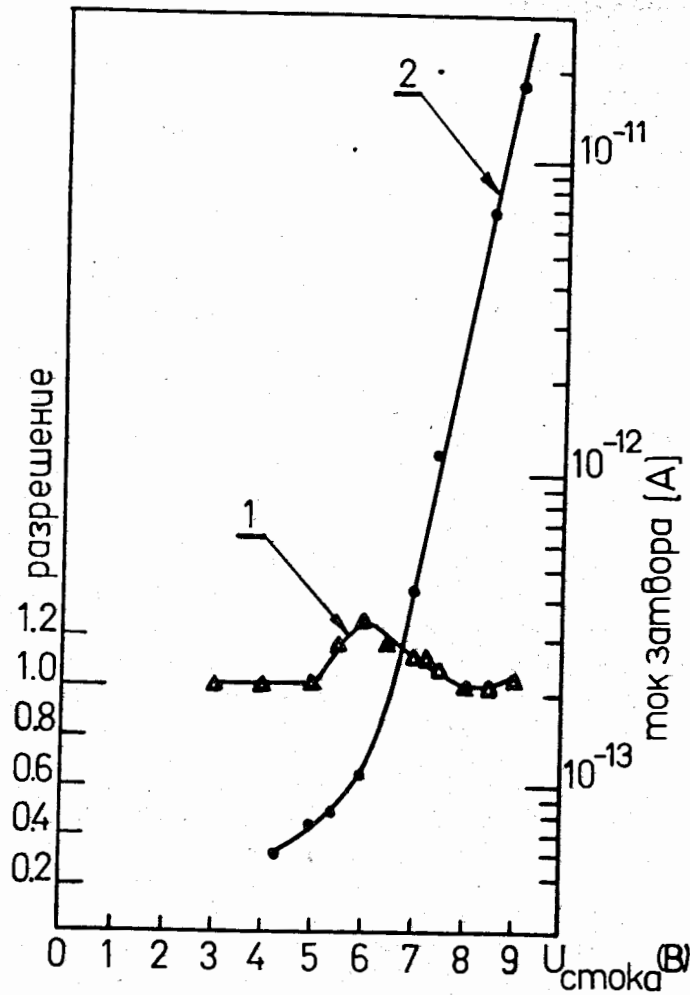


Рис. 1. Зависимость разрешения 1 и тока затвора 2 от напряжения в стоке. Предусилитель - с обратной связью в сток. Температура корпуса полевого транзистора - 180-200 К. Разрешение в относительных единицах.

Принципиальная схема предусилителя с импульсной световой обратной связью, используемая нами, изображена на рис. 2. Основу предусилителя составляет широко применяемая каскадная пара полевого транзистора с биполярным транзистором. Полевой транзистор 2N4416 изъят из фирменного корпуса и помещен вместе со световым диодом в корпус из нитрида бора. На рис. 3 приведена конструкция охлаждаемой части спектрометра. Она подобна конструкции, описанной Ласером^{/9/}.

Отметим, что при изготовлении охлаждаемой части спектрометра необходимо тщательное выполнение монтажа и жесткое крепление всех элементов /особенно фильтра/, а также головной части в целом по отношению к корпусу криостата. Несоблюдение этого правила приводит к возникновению "микрофонного" эффекта на частотах 1-10 кГц и к появлению дополнительного размытия спектральной линии при $\tau_{\phi} = 8-16$ мкс.

После прохождения предусилителя сигнал поступает последовательно на усилитель, формирователь спектрометрических сигналов^{/10/} и анализатор. Усилитель имеет единственную дифференцирующую цепь на входе и многократное интегрирование, которое обеспечивает форму импульса, близкую к кривой Гаусса. На время восстановления блокируются: усилитель, устройство, поддерживающее неизменным выходной уровень усилителя в формирователе спектрометрических импульсов, и многоканальный анализатор.

Зависимость разрешения по генератору /при подключенном детекторе/ от тока стока приведена на рис. 4. Зависимость квадрата разрешения от величины $1/\tau_{\phi}$ для двух значений тока стока представлена на рис. 5. Проведем идентификацию типа шумов для тока $I_{ст.} = 7,5$ мА /кривая 1 на рис. 5/. Значительную долю полного шума на больших формировках ($\frac{1}{\tau_{\phi}} < \frac{1}{8}$) составляет шум типа $1/f$ системы детектор - ф. полевой транзистор. При $\tau_{\phi} = 16$ мкс / $t_{\text{фронта}} = 44$ мкс/ этот шум становится определяющим. Заметно влияние параллельного белого

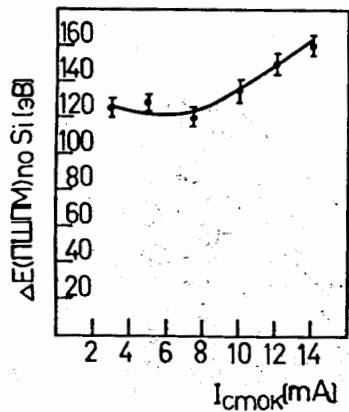


Рис. 4. Зависимость разрешения от тока стока. Предусилитель - с импульсной световой обратной связью, разрешение по генератору с подсоединенным детектором.

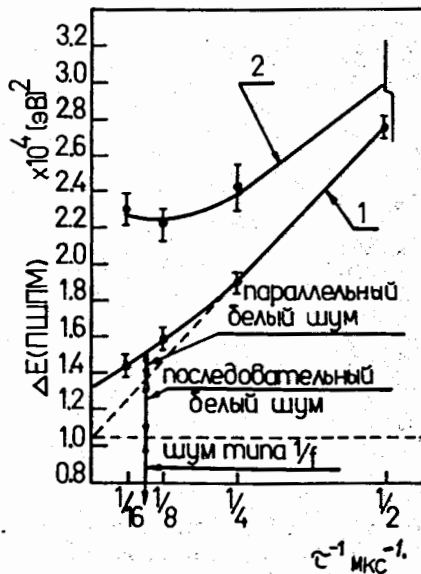


Рис. 5. Зависимость квадрата разрешения от τ^{-1} . Кривая 1 - ток стока 7,5 мА, кривая 2 - ток стока 13 мА.

шума, который вызывается током утечки детектора. Измеренный независимым способом, этот ток составлял $/2-3/ \cdot 10^{-13} \text{ А}$. Расчетное значение шумового вклада, вызываемого таким током, для $\tau_{\phi} = 8 \text{ мкс}$ составляет 30-40 эВ. Кривая 1 на рис. 5 показывает, что, действительно, имеется вклад параллельного белого шума, величина которого с хорошей точностью совпадает с его

расчетным значением. Для тока стока $I_{\text{ст.}} = 13 \text{ мА}$ /кривая 2 на рис. 5/ идентификация шума не такая однозначная, как для тока в 7,5 мА. На первый взгляд, избыточный шум можно было бы связать с увеличением тока утечки детектора и повышением параллельного белого шума. Однако дополнительные измерения показали, что ток утечки слабо зависит от тока стока полевого транзистора. Наблюдаемый избыточный шум можно объяснить, если предположить, что увеличение тока стока ведет к значительному повышению шума типа $1/f^n$, где $n > 1$, то есть к повышению процессов, связанных с явлением захвата основных носителей тока в канале, и увеличению так называемого генерационно-рекомбинационного шума.

КРЕМНИЕВЫЙ ДЕТЕКТОР

Геометрию детектора и основные операции по его изготовлению мы описали ранее ^{/11/}. Стремясь получить хорошо компенсированный i -слой, особое внимание мы уделили стадии выравнивающего дрейфа. Эта операция длилась 5-6 дней при умеренном режиме: температура 65-70° С, напряжение $\leq 100 \text{ В}$, обратный ток 30-70 мкА. Степень компенсации в процессе выравнивания контролировалась по ходу зависимости $1/C_{\text{дет.}} = f(u)$, а на готовых детекторах - по скорости счета под фотопиком линии $E_{\gamma} = 59,6 \text{ кэВ}$ при различных напряжениях смещения. На рис. 6 показаны результаты таких измерений для двух детекторов. Видно, что для хорошо скомпенсированного детектора /Н8/ величина обратной емкости

$$\frac{1}{C_{\text{дет.}}} \text{ и эффективность счета } I_{60} \text{ для энергии}$$

$E_{\gamma} \approx 60 \text{ кэВ}$ практически не меняются, начиная с напряжений 40-50 В. Недостаточное выравнивание /дет. №13/ приводит к тому, что насыщение не достигается даже при напряжениях 800-1000 В. О хорошей компенсации свидетельствует и тот факт, что, начиная с напряженностей поля $\mathcal{E} = 25-30 \text{ В/мм}$ /использовались детекторы с толщиной чувствительной области

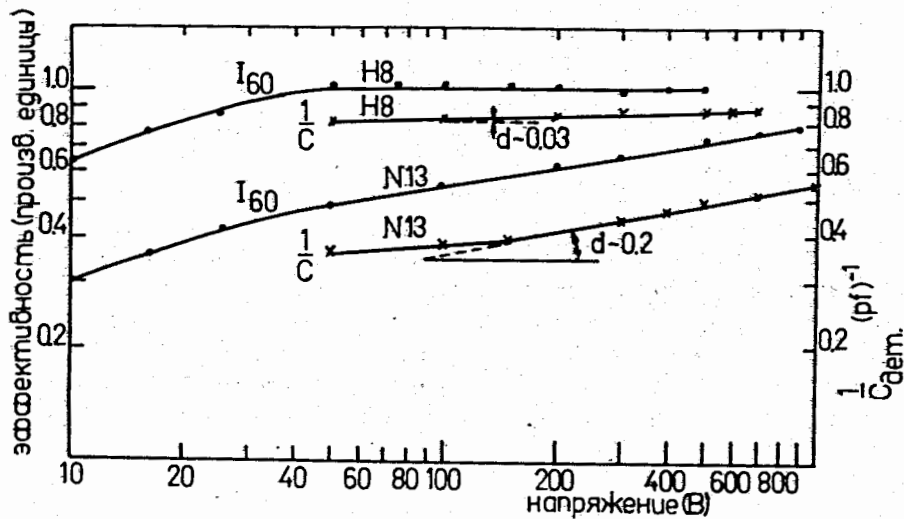


Рис. 6. Зависимость C^{-1} детектора и относительной эффективности регистрации излучения с энергией 59,6 кэВ от напряжения смещения.

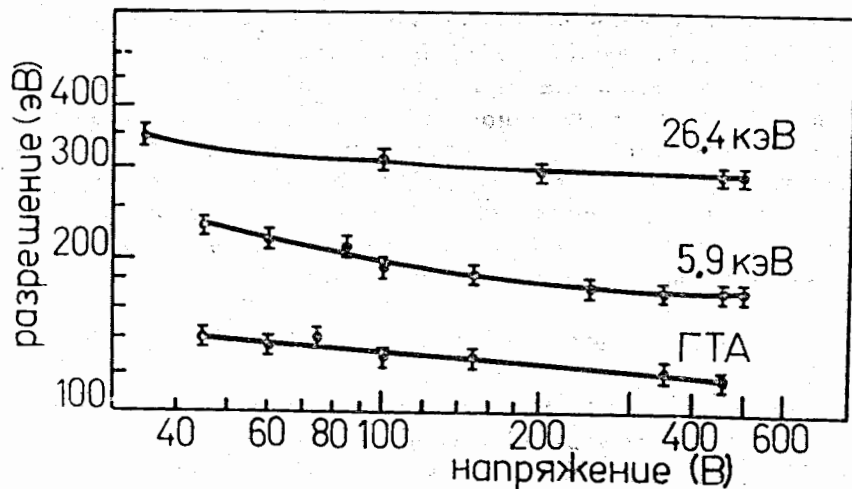


Рис. 7. Зависимость разрешения от напряжения детектора.

$W = 4-4,5$ мм/, разрешение достаточно хорошее и слабо меняется с повышением поля /рис. 7/.

На рис. 8 приведен один из спектров, полученный с помощью детектора толщиной $W = 4,2$ мм, и с чувствительной поверхностью $S = 30$ мм². Результаты по разрешению для других энергий рентгеновского излучения приведены в табл. 1.

Таблица 1

E [кэВ]	3,69	4,51	5,41	5,9	6,4	8,05	14,4	26,4	59,6
$E_{\text{эксп.}}$ (эВ)	152 ±4	156	162	168	178 ±6	185	225 ±8	290 ±18	430 ±18
Ест. (эВ)	88	97	106	111	116	130	174	235	354

В этой же таблице приведен теоретический предел разрешения при $\Delta E_{\text{эл}} = 0$, определяемый статистикой образования электронно-дырочных пар $\Delta E_{\text{см}} = 2,35 \sqrt{F \epsilon E}$, вычисленный в предположении, что фактор Фано $F = 0,1$. Очевидно, что, начиная с энергии 5-6 кэВ /при достигнутом уровне шумов/, вклад детектора становится преобладающим. Неполное и неоднородное собирание заряда в детекторе еще больше увеличивает этот вклад.

Чтобы проанализировать качество детектора, обратимся к рассмотрению экспериментально полученной зависимости разрешения от энергии регистрируемых квантов /табл. 1/. Суммарное /аппаратурное/ разрешение в зависимости от энергии E можно записать в общем виде так:

$$(\Delta E_{\text{эксп.}})^2 = (\Delta E_{\text{эл.}})^2 + aE + bE^2,$$

где $\Delta E_{\text{эл.}}$ - шумы электроники, aE - вклад за счет флуктуации числа образованных и собранных пар при средней /однородной по площади детектора/ потере заряда - $\bar{\lambda}$, bE^2 - вклад за счет разброса параметра потерь

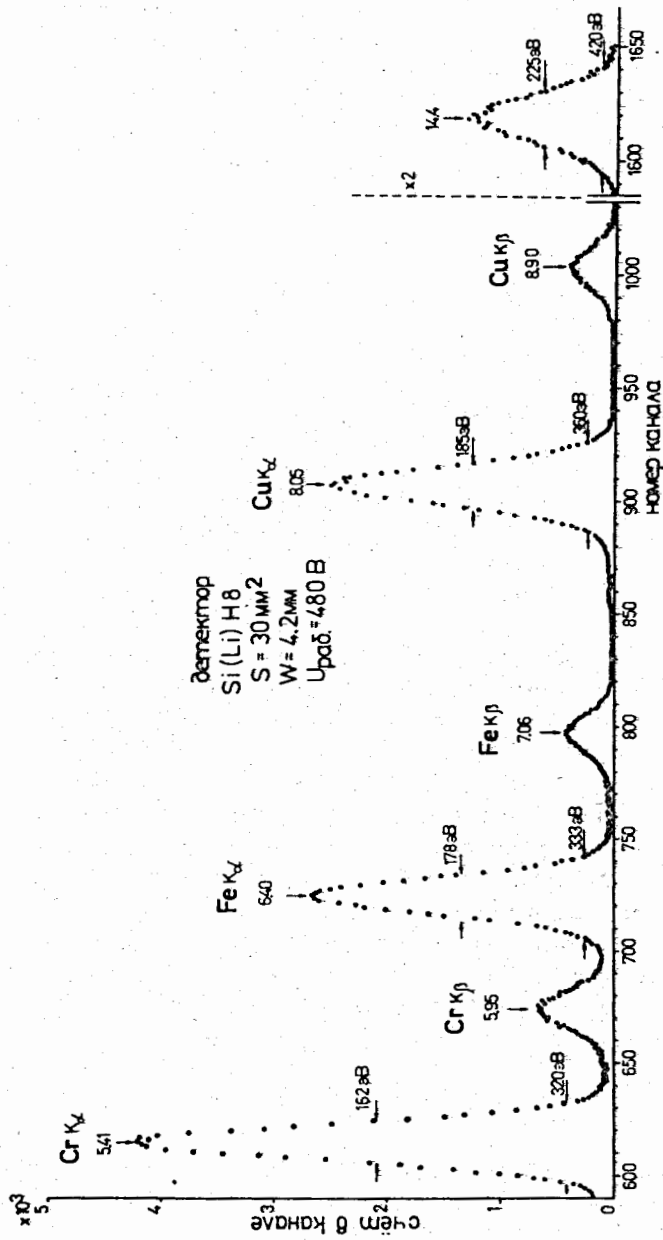


Рис. 8. Спектр рентгеновского излучения Cr, Fe и Cu.

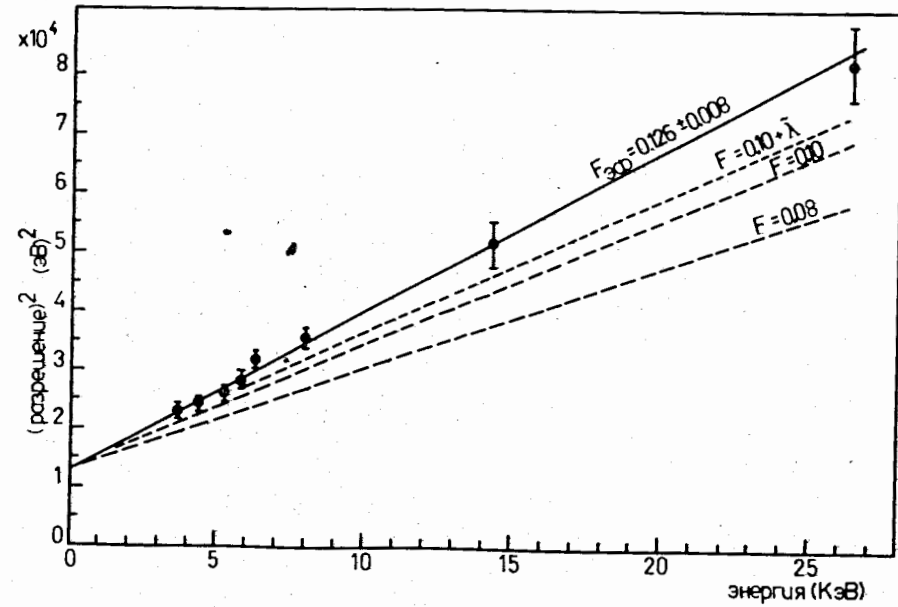


Рис. 9. Зависимость квадрата разрешения от энергии.
● - экспериментальные точки, --- - расчетные значения для $E_{эл.} = 115$ эВ и $F = 0,08$, $F = 0,1$ и $F_{эфф.} = 0,1 + \lambda_{эксп.}$

λ по площади детектора. Результаты табл. 1 приведены на рис. 9 в удобной для анализа форме $(\Delta E_{эксп.})^2 = f(E)$. Прямая, проведенная методом наименьших квадратов через экспериментальные точки, отсекает на оси ординат значение, соответствующее $\Delta E_{эл.} = 113 \pm 9$ эВ, что достаточно хорошо совпадает с измеренным по генератору $\Delta E_{эл.} = 115$ эВ. Хорошее выполнение линейной зависимости $(\Delta E_{эксп.})^2 = (\Delta E_{эл.})^2 + aE$, казалось бы, говорит о не очень существенном влиянии неоднородностей на разрешение детектора.

Вычисленное по наклону прямой эффективное значение фактора Фано $F_{эфф.} = 0,126 \pm 0,008$. Отметим, что анализ лучших результатов по спектрометрии рентгеновского излучения, приводимых в литературе [12,13], дает величину $F_{эфф.} = 0,12-0,13$ для детекторов несколько меньшей площади - 10-20 мм².

Измеряя разрешение при различных напряжениях и проводя экстраполяцию к бесконечно большому полю, мы получили "истинное" значение фактора Фано $F = 0,098$. Цуллигер^{/14/} приводит значения $F = 0,08-0,09$, полученные аналогичным образом. Чтобы объяснить заметное превышение $F_{эфф.}$ величины $0,08-0,09$, надо допустить, что средние потери заряда в нашем случае составляют 3-4%. Однако измерения при различных напряжениях показали, что они не превышают 1,5% для $E = 5,9$ кэВ и монотонно убывают до значения $\bar{\lambda} = 0,3\%$ при энергии $E_{\gamma} = 59,6$ кэВ, что не может объяснить наблюдаемых результатов /кривая $F_{эфф.} = 0,10 + \bar{\lambda}$, рис. 5/, особенно при энергиях 26,4 и 59,6 кэВ.

Возможны два объяснения:

1/ Неоднородности все же играют существенную роль, особенно при больших энергиях.

2/ Существуют потери заряда, не зависящие от напряженности поля, и величина их -1-2%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

-Анализ полученных результатов показывает, что, используя предусилитель с импульсной световой обратной связью и увеличивая время формирования до $\tau_{ф} = 8-16$ мкс, можно снизить белый последовательный шум до уровня 40-45 эВ, параллельный - до 30-35 эВ /при обратном токе детектора 10^{-13} А/. Основная составляющая электронного разрешения /105 эВ/ - шум типа $1/f$, который не зависит от величины постоянной времени формирования сигнала и определяется полевым транзистором. Уменьшение этой составляющей возможно только за счет совершенствования технологии изготовления полевых транзисторов, направленного на снижение низкочастотных шумов.

Вклад детектора на энергии 5,9 кэВ составляет 120 эВ и, в основном, объясняется статистикой образования пар. На энергиях 30-60 кэВ наблюдается некоторое превышение разрешения над расчетным значением /430 эВ вместо 380 эВ при $E = 59,6$ кэВ и $F = 0,1$ /. Наблюдаемые средние потери заряда не объяс-

няют этого превышения, если не предположить существенной их неоднородности или наличия потерь заряда -1-2%, не зависящих от напряженности поля.

Полученное разрешение соответствует уровню лучших зарубежных коммерческих спектрометров.

Изготовленный спектрометр используется в Лаборатории ядерных реакций уже полгода без заметного ухудшения характеристик.

Авторы приносят благодарность академику Г.Н.Флеорову за постоянное внимание и поддержку работ по рентгеновской спектрометрии. Благодарим А.В.Соколова, Р.А.Никитину и А.Н.Кузнецова за помощь при изготовлении детекторов и настройке усилителя спектрометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубарева А.М., Субботин В.Г., Субботина Г.Г. ОИЯИ, P13-3718, Дубна, 1968.
2. Radeka V. Symposium on Nuclear Electronics. Versailles, France, Sept. 10-13, 1968.
3. Goulding F.S., Walton J.T., Malone D.F. NIM, 1969, v. 71, p. 273.
4. Goulding F.S., Walton J.T., Pehl R.H. IEEE Trans., 1970, NS-17, No. 1, p. 218.
5. Landis D.A., Goulding F.S., Jaklevic J.M. NIM, 1970, v. 87, p. 211-213.
6. Landis D.A., Goulding F.S., Pehl R.H., Walton J.T. IEEE Trans., 1971, NS-18, No. 1, p. 115-124.
7. Elad E. IEEE Trans., 1972, NS-19, No. 1, p. 403.
8. Субботин В.Г. Международный симпозиум по ядерной электронике. Варшава 23-30 сентября 1971 г. ОИЯИ, Д13-6210, Дубна, 1972.
9. Llacer J. Proceedings 2nd ISPRANuclear Electronics Symposium. Stresa, Italy, May 20-23, 1975, p. 47.
10. Зубарева А.М., Субботин В.Г. ОИЯИ, P13-10277, Дубна, 1976.

11. Субботин В.Г., Харитонов Ю.П., Выронаев В.Я., Кушнёрук В.Ф. ОИЯИ, P13-7963, Дубна, 1974.
12. Kandiah K., Smith A.I., White G. *Proceedings 2nd ISPRA Nuclear Electronics Symposium, Stresa, Italy May 20-23, 1975*, p. 153.
13. *Instruments for Research and Industry. Catalog 1004 ORTEC*, 1976.
14. Zulliger H.R., Aitken D.W. *IEEE Trans.*, 1970, Ns-17, No. 3.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 февраля 1977 года.