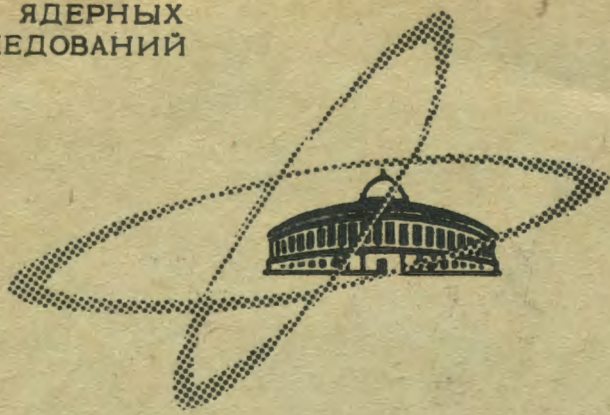


26/III 68

Б-325  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 3718



Бачонэ, В.Ф.Кушнирук, В.Г.Субботин,  
З.А.Тер-Акопьян, Ю.П.Харитонов, Зо Зен Сам

**Si (Li) – ДЕТЕКТОРЫ И ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ  
ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИИ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ  
КОНВЕРСИОННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ  
И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

АБСОЛЮТНОЕ ЯДЕРНОЕ РЕЗЕРВУАРНОЕ

1968

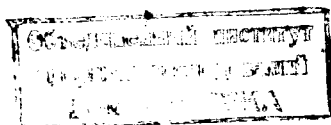
*[Handwritten signatures and scribbles]*

P13 - 3718

7221/2 up

Бачонэ, В.Ф.Кушнирук, В.Г.Субботин,  
З.А.Тер-Акопян, Ю.П.Харитонов, Зо Зен Сам

**Si (Li) — ДЕТЕКТОРЫ И ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ  
ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИИ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ  
КОНВЕРСИОННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ  
И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**



Применяя метод дрейфа лития в кремнии, можно изготовить детекторы с чувствительным слоем в несколько миллиметров и тонким входным окном /1/. Такие детекторы дают возможность получить хорошее разрешение по энергии и достаточно высокую эффективность регистрации электронов внутренней конверсии и рентгеновского излучения /2/.

Теоретический предел разрешения, определяемый статистикой образования пар в кремнии, равен 0,35 кэв для  $\gamma$  - излучения с энергией 50 кэв и 1 кэв - для электронов с энергией 600 кэв. Уровень собственных шумов лучших ламповых предусилителей значительно больше этих величин и составляет 1,5 - 2 кэв.

Нами использовался предусилитель с охлаждаемым полевым транзистором на входе. С охлаждением полевого транзистора его шумовые параметры улучшаются (ток затвора уменьшается на несколько порядков, крутизна возрастает в 2-3 раза). Разрешение, получаемое с таким предусилителем, в несколько раз выше, чем с лучшими ламповыми предусилителями /3-5/.

Для спектрометрии электронов конверсии и рентгеновского излучения мы использовали поверхностно-барьерные Si(Li) - детекторы, у которых входным окном служит слой золота  $\approx 100$  мкг/см<sup>2</sup>. Уменьшение толщины входного окна не только расширяет область энергий регистрируемых частиц, но и приводит к улучшению энергетического разрешения, поскольку уменьшаются флуктуации, связанные с потерей энергии в веществе окна.

Кроме хорошего разрешения и высокой эффективности регистрации у полупроводникового спектрометра есть и еще ряд достоинств: "многоканальность", т.е. возможность получения информации о всей области изучаемых энергий сразу в одном опыте; малые габариты и сравнительная простота устройства; хорошие временные свойства и удобство работы в схемах совпадений. Благодаря этому спектрометр с полупроводниковым детектором может служить важным дополнением к магнитным  $\beta$ -спектрометрам и дифракционным спектрометрам, особенно при изучении короткоживущих и слабых активностей.

### Изготовление детекторов

Нами использовались основные методы, описанные в работах /1,6/. Технология изготовления детекторов состоит из следующих операций:

- 1) Пластины кремния  $p$ -типа с удельным сопротивлением 200-4000 ом-см, толщиной 1-3 мм шлифуются порошком  $Al_2O_3$  с размером зерна 10 мк, затем тщательно промываются спиртом и трихлорэтиленом.
- 2) На одну из сторон наносится литиевая паста (суспензия лития в минеральном масле). Образцы помещаются в печь для диффузии. Диффузия проводится в атмосфере аргона при температуре 380-400°C в течение 10 минут. (Предварительно образцы выдерживаются при температуре 200°C, пока выгорит минеральное масло, а затем вводятся в глубь печи).
- 3) После диффузии образцы промываются в смеси воды и спирта чтобы удалить свободный литий с поверхности кристалла. Затем вся пластина травится 1/2 минуты для удаления следов лития, который мог попасть на образец при промывке. Для травления используется смесь концентрированных  $HNO_3$  и  $HF$  в отношении 3:1 (так называемый травитель 3:1).
- 4) Центральная часть покрытой литием поверхности и обратная сторона образца защищаются с помощью силиконовой резины и образец

травится в травителе 3:1 в течение 6-8 минут. В результате образец принимает вид меза-структуры (рис.4).

5) На обратную поверхность образца вакуумным испарением наносится слой золота. Если обратный ток полученного диода не превышает 10 мка при напряжении 200-250 вольт, образец ставится на дрейф. При большем токе операция травления повторяется.

6) Дрейф проводится в обычной атмосфере в печи при температуре 100-120°C и напряжении 400-500 вольт. Дрейф на глубину 3 мм длится около 5-ти суток.

7) После окончания дрейфа обратная сторона образца шлифуется и окрашивается в растворе  $CuSO_4$  с небольшим количеством  $NH_4$ . Шлифовка продолжается до тех пор, пока площадь  $i$ -области не сравняется с площадью меза-структуры.

8) Поверхность с литием защищается полистиролом и образец травится 3-4 минуты в травителе 3:1. Затем полистирол удаляется и проводится дополнительное травление в течение 1/2 минуты.

9) Снова напыляется золото на контакт с литием и на всю противоположную сторону.

10) Снимается вольт-амперная характеристика полученного детектора. Обратный ток у лучших образцов равен 2-3 мка при напряжении 300 вольт.

### Предусилитель

Зарядово-чувствительный предусилитель, который мы использовали (рис.1), состоит из каскодной пары ( $T_1$  и  $T_2$ ) с динамической нагрузкой в коллекторе транзистора  $T_2$  и дополнительного каскада усиления с низкоомным выходом ( $T_3, T_6, T_7, T_8, T_9$ ). Аналогичные схемы предусилителей использовались в работах /1,7/.

Полевые транзисторы отбирались нами на минимум последовательного шума, так как у большинства из них эквивалентное сопротивление

последовательных шумов значительно превышает величину

$$R = \frac{0,7}{S} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{C_{\text{затвор-исток}}}{C_{\text{входа}}} \right)^2 \right],$$

которая теоретически определяет вклад последовательного теплового шума канала <sup>/8/</sup>. Дополнительный шум, вероятнее всего, есть шум типа "1/f" проводящего канала <sup>/4/</sup>.

В нашем предусилителе использовался полевой транзистор со следующими параметрами при комнатной температуре:

$$\begin{aligned} \text{крутизна} \quad S_{\text{пт}} &= 5,5 \text{ ма/в}, \\ \text{ток утечки затвора} \quad I_{\text{з}} &= 10^{-12} \text{ а}, \\ \text{входная емкость} \quad C_{\text{вх}} &= 5 \text{ пф}. \end{aligned}$$

У первой, зарядово-чувствительной секции предусилителя коэффициент усиления без обратной связи  $K = 1500$ , если температура полевого транзистора близка к комнатной. Емкость обратной связи равна 0,3 пф. Полевой транзистор ( $T_1$ ) и все детали, присоединяемые к его затвору и к проводу, соединяющему детектор с переходной емкостью  $C_5$ , помещаются в камеру для охлаждения детектора. Корпус транзистора находится в тепловом контакте с медной пластиной, к которой крепится детектор. Детектор и полевой транзистор охлаждаются до температуры  $140^\circ\text{К}$ .

При комнатной температуре разрешение предусилителя составляет

$$\Delta E(\text{Si}) = 1,0 \text{ (кэв)} + 0,08 \left( \frac{\text{кэв}}{\text{пф}} \right) C,$$

а при температуре  $140^\circ\text{К}$

$$\Delta E(\text{Si}) = 0,7 \text{ (кэв)} + 0,06 \left( \frac{\text{кэв}}{\text{пф}} \right) C.$$

Разрешение определялось при однократном формировании импульса в основном усилителе, причем  $\tau_{\text{инт}} = \tau_{\text{диф}} = 2 \text{ мксек}$ .

Для получения высокого разрешения электрические параметры детектора (ток утечки и емкость) не должны вносить значительного ухудшения в разрешение предусилителя. Емкость детектора должна быть минимальной. Емкость изготовленных нами детекторов с площадью  $1 \text{ см}^2$  и с толщиной чувствительного слоя 3 мм составляла от 3 до 5 пф. Желательно, чтобы обратный ток детектора не превышал  $10^{-10} \text{ а}$ . Тогда вклад в шумы, определяемый выражением  $\Delta E = 0,92 \sqrt{i_{\text{обр}}}$  (на  $r$  (мсек)), равен 0,4 кэв.

### Результаты измерений

На рис.2 приведен спектр L-серии рентгеновского излучения <sup>241</sup>Am, полученный с детектором площадью  $0,8 \text{ см}^2$  и толщиной чувствительного слоя 2,6 мм. Напряжение смещения 800в. Разрешение  $L_{\alpha_1}$  линии (13,96кэв) составляет 0,92 кэв, что можно объяснить шумовыми свойствами предусилителя и электрическими параметрами детектора, если учесть, что эта линия состоит из  $L_{\alpha_1}$  и  $L_{\alpha_2}$  линий, имеющих сравнимые интенсивности и отличающихся по энергии на 0,18 кэв. Уширение  $L_{\beta_1}$  линии (17,76 кэв) связано с присутствием  $L_{\beta_2}$  (16,95 кэв). Зависимость разрешения от напряжения смещения для этого детектора показана на рис.5.

Спектр K-серии рентгеновского излучения и электронов конверсии <sup>109</sup>Cd, полученный с тем же детектором, показан на рис.3.

На рис.4 приведен спектр электронов конверсии <sup>137</sup>Cs. Спектр получен с детектором площадью  $1 \text{ см}^2$  и толщиной чувствительного слоя 1,6 мм при напряжении смещения 600в. Обратный ток детектора при  $T = 140^\circ\text{К}$  и напряжении смещения 300в был равен  $2 \cdot 10^{-10} \text{ а}$ . В этом случае использовался предусилитель, который с охлаждением имел разрешение

$$\Delta E(SI) = 1(\text{кэВ}) + 0,06 \left( \frac{\text{кэВ}}{\text{пф}} \right) C.$$

Разрешение К - электронов конверсии - 2,6 кэВ; разрешения измеренное по линии генератора при подключенном детекторе, равно 1,7 КэВ. При тех же условиях измерения, что и для рентгеновского излучения с детектором  $\delta = 2,6$  мм, разрешение К - электронов внутренней конверсии от источника  $^{137}\text{Cs}$  составляет 4,8 КэВ. Для получения спектров электронов конверсии с детектором толщиной 1,6 и 2,6 мм использовался один и тот же источник.

Результаты для двух детекторов сведены в следующую таблицу:

Источник	Разрешение (кэВ)	
	$\delta = 1,6$ мм	$\delta = 2,6$ мм
$^{109}\text{Cd}$ $E_{\beta} = 62,2$ КэВ		2,7
$^{137}\text{Cs}$ $E_{\beta} = 624$ КэВ	2,6	4,8
$^{109}\text{Cd}$ $E_{\gamma} = 22,1$ КэВ		1,0
$^{241}\text{Am}$ $E_{\gamma} = 14$ КэВ	1,6	0,92

Полученные результаты показывают значительное ухудшение разрешения для электронов внутренней конверсии. Это может быть связано с толщиной источника, рассеянием от подложки источника, с входным окном детектора. Однако сравнение результатов для  $^{137}\text{Cs}$ , полученных для детекторов с толщиной чувствительного слоя 1,6 мм и 2,6 мм,

с одним и тем же источником указывает на значительное ухудшение разрешения из-за процессов, связанных с флуктуациями собираемого заряда в детекторе.

Нами были испытаны 6 детекторов. Все они имели разрешение для рентгеновского излучения не хуже 2 кэВ, а для электронов конверсии  $^{109}\text{Cd}$  не хуже 3 кэВ. Необходимо отметить, что для некоторых детекторов наблюдалось незначительное ухудшение разрешения после 3-4 месяцев хранения.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность профессору Г.Н.Флерову за оказанную поддержку и постоянный интерес к работе, а также В.И.Кузнецову, Б.В.Фефилову и Х.Юнгклауссену за обсуждение результатов и ряд полезных замечаний.

#### Л и т е р а т у р а

1. F.S.Goulding, UCRL - 16231 (1965).
2. H.R.Bowman et al., *Science*, Vol 151, No 3710, 562 (1966).
3. J.L.Blankenship, *IEEE Trans. NS-11*, N3, 373 (1964).
4. T.V.Blalock, *IEEE Trans NS-13*, N3, 465 (1966).
5. K.F.Smith, J.E.Cline, *IEEE Trans NS-13*, N3, 468 (1966).
6. Дж.Мейер и др., в сб.статей "Полупроводниковые счетчики излучений", Госатомиздат, 1962, стр.105.
7. T.V.Blalock, *IEEE Trans. NS-11*, N3, 365 (1964).
8. V.Radeka, *IEEE Trans, NS-11*, N3, 358 (1964).

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 февраля 1968 года.

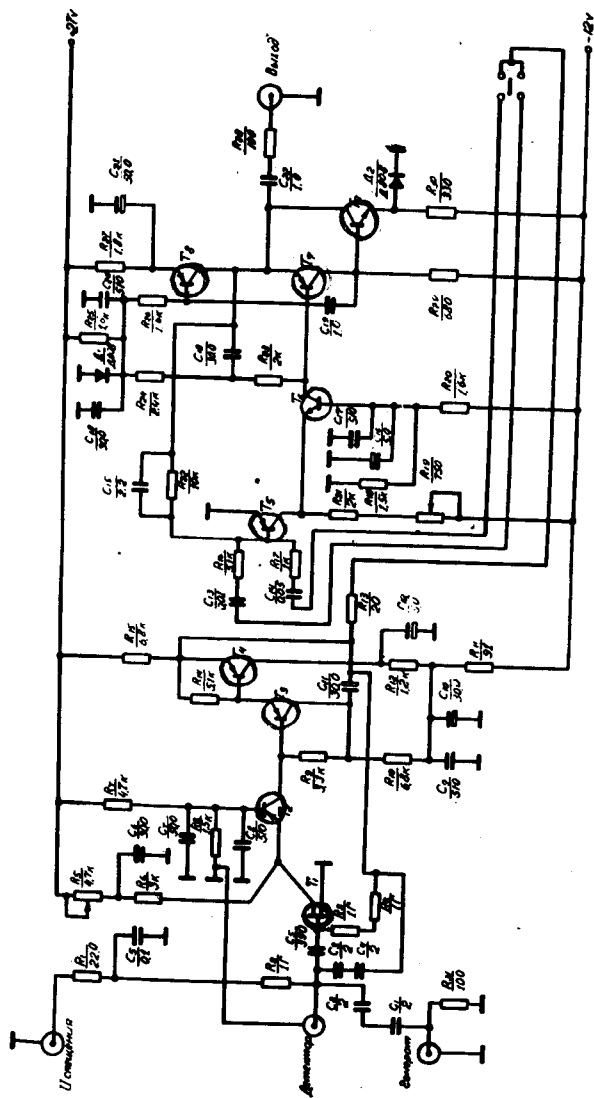


Рис.1. Принципиальная схема предусилителя.

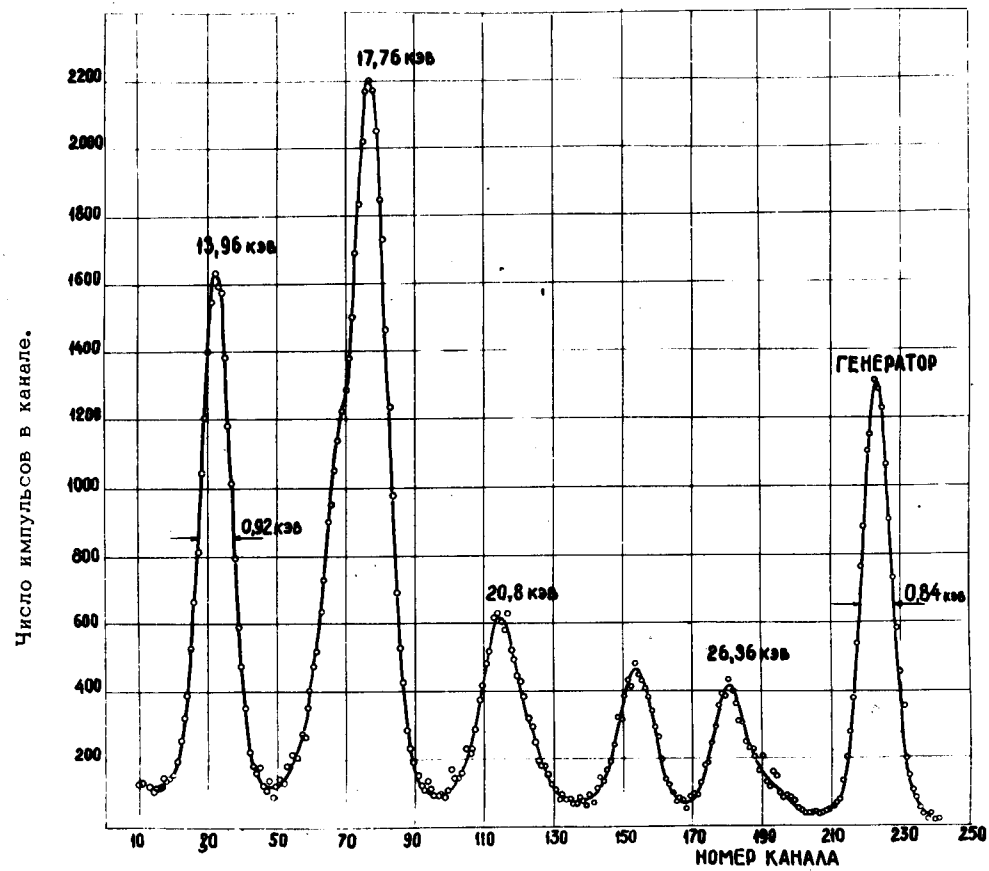
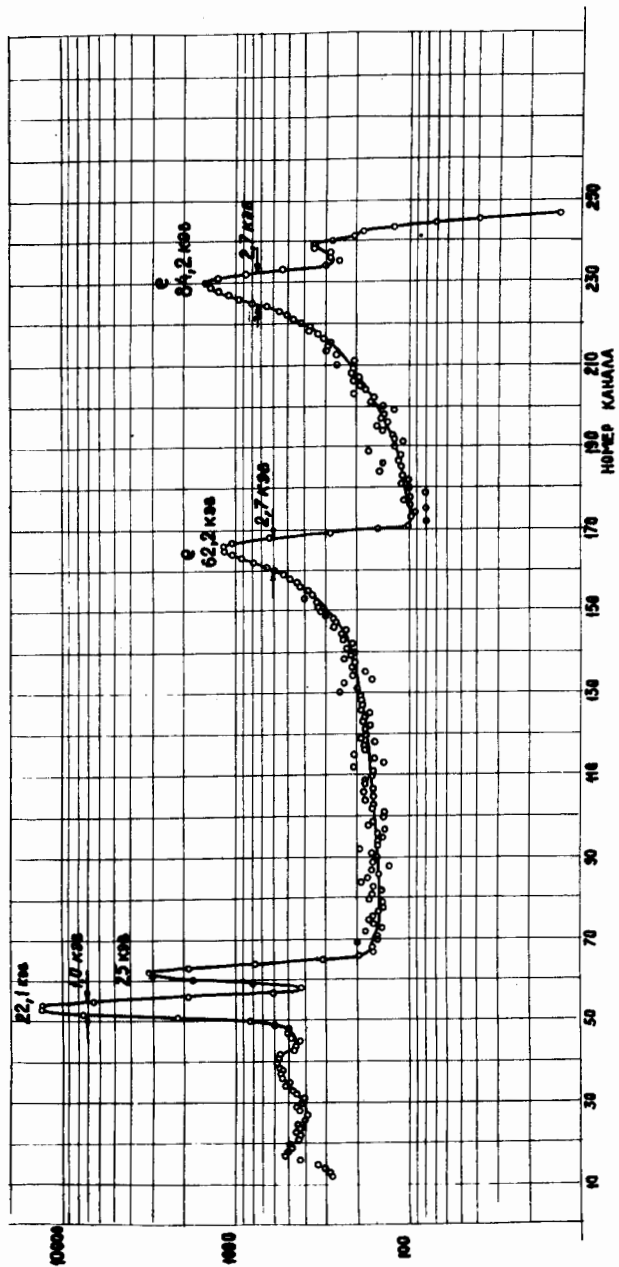


Рис.2. Спектр рентгеновского излучения  $^{241}\text{Am}$ . Si(Li) - детектор,  
 $S = 80 \text{ мм}^2$ ,  $\delta = 2,6 \text{ мм}$ ,  $U_{\text{см}} = 800 \text{ вольт}$ ,  $T = 140^\circ \text{ К}$ ,  
 $\tau_{\text{диф}} = \tau_{1 \text{ инт}} = \tau_{2 \text{ инт}} = 2 \text{ мксек}$ .



Число импульсов в канале.

Рис.3. Спектр рентгеновского излучения и электронов конверсии  $^{108}\text{Cd}$ .  
 $\text{Si}(\text{Li})$  - детектор,  $S = 80 \text{ мм}^2$ ,  $\delta = 2,6 \text{ мм}$ ,  $U_{\text{см}} = 800 \text{ вольт}$ ,  
 $T = 140^\circ\text{К}$ ,  $\tau_{\text{диф}} = \tau_1 \text{ инт} = \tau_2 \text{ инт} = 2 \text{ мксек}$ .

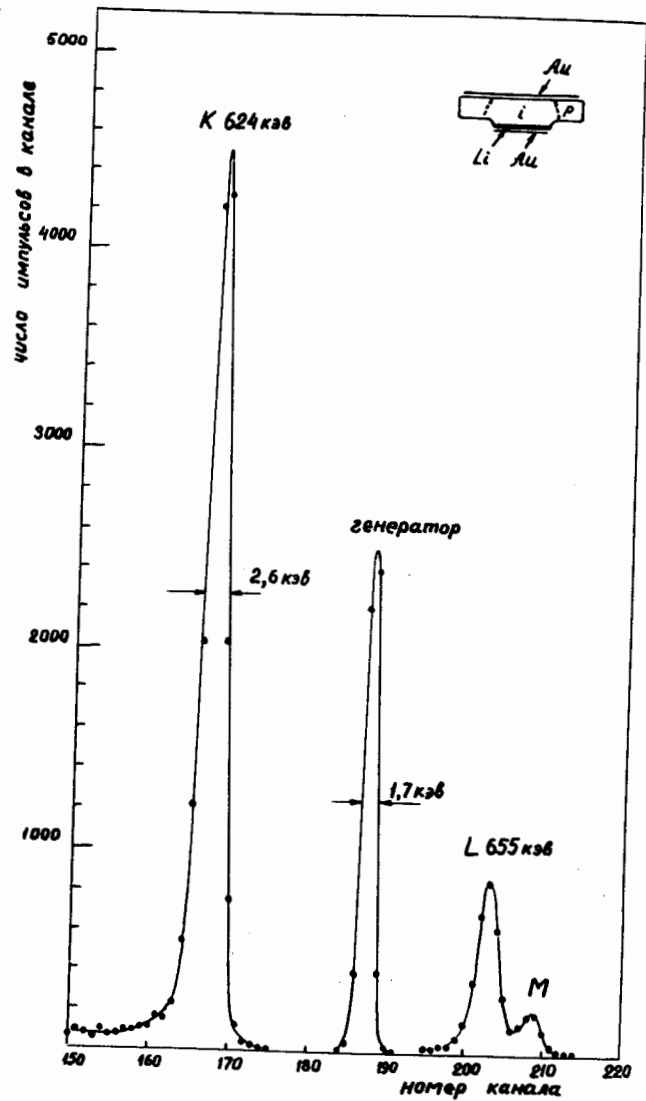


Рис.4. Спектр электронов конверсии  $^{137}\text{Cs}$ .  $\text{Si}(\text{Li})$  - детектор,  $S = 1 \text{ см}^2$ ,  $\delta = 1,6 \text{ мм}$ ,  $U_{\text{см}} = 600 \text{ вольт}$ ,  $T = 140^\circ\text{К}$ ,  $\tau_{\text{диф}} = \tau_1 \text{ инт} = 1 \text{ мксек}$ .



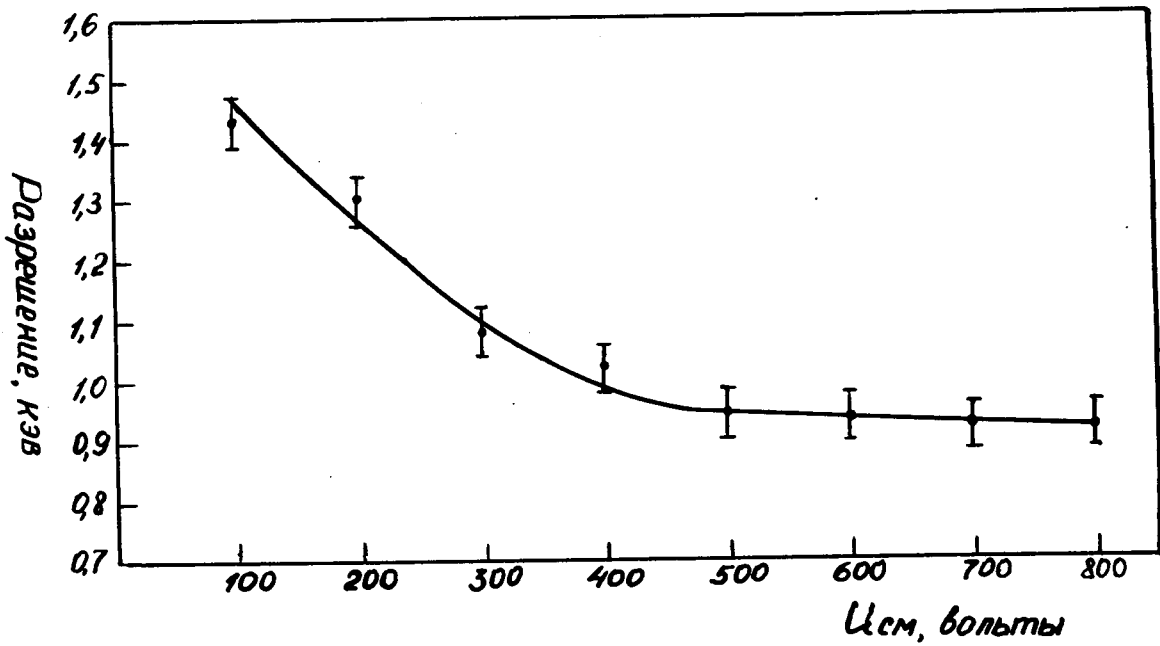


Рис.5. Зависимость разрешения от напряжения смещения для рентгеновского излучения  $^{241}\text{Am}$ .