

A-187

23/12-68

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

7 - 4039



В.В.Авдейчиков, В.В.Волков, Г.Ф.Гриднев,  
О.В.Ложкин, Н.А.Перфилов

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ  
ТОНКИХ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
ТИПА  $dE/dx$  ДЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

1968

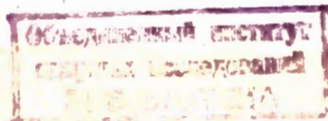
7 - 4039

В.В.Авдейчиков\*, В.В.Волков, Г.Ф.Гриднев,  
О.В.Ложкин\*, Н.А.Перфилов\*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ  
ТОНКИХ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
ТИПА  $dE/dx$  ДЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

х)

Радиовый институт им. В.Г.Хлопина



## 1. Введение

Среди существующих методов идентификации частиц-продуктов ядерных реакций большое распространение получил метод, в котором одновременно измеряется энергия частицы и ее удельная ионизация. Как следует из выражения для удельной ионизации частицы, произведение этих двух величин в нерелятивистском случае пропорционально  $Z^2 M$  и слабо зависит от энергии

$$dE/dx = (K_1 M Z^2 / E) l_n (E / K_2 M).$$

Здесь:  $M$  и  $Z$  — масса и заряд частицы,  $E$  — энергия частицы,  $K_1$  — коэффициент, содержащий лишь физические константы,  $K_2$  — зависит лишь от свойств поглотителя.

В системе координат с осями  $E$  и  $dE/dx$  каждому значению  $Z$  и  $M$  соответствует определенная гипербола. Нетрудно видеть, что с ростом  $M$  и  $Z$  частицы повышаются требования к разрешающей способности детекторов для надежной идентификации отдельных изотопов.

Общепринято сейчас в качестве детектора  $E$  использовать полупроводниковый детектор, а в качестве детектора  $dE/dx$  — либо полупроводниковый детектор для разделения изотопов водорода и гелия, либо различные типы ионизационных камер для разделения изотопов более тяжелых элементов.

Применение тонких полупроводниковых детекторов для измерения удельной ионизации тяжелых ионов сдерживается, главным образом, трудностями их изготовления. Большая удельная ионизация, создаваемая тяжелым ионом, и возрастающие с  $Z$  и  $A$  требования к энергетическому разрешению приводят к необходимости изготовления детекторов толщиной в несколько десятков микрон с высокой плоскопараллельностью (с разбросом толщины порядка  $0,1$  мк по рабочей площади около  $1 \text{ см}^2$ ). Вместе с тем полупроводниковые детекторы  $dE/dx$  обладают рядом преимуществ перед ионизационными камерами. Они компактны, проще в обращении, легко размещаются в камерах рассеяния; между мишенью и детектором нет поглощающих энергию фольг. Поэтому разработка тонких детекторов для экспериментов с тяжелыми ионами — насущно необходимая задача.

## 2. Характеристики тонких кремниевых детекторов $dE/dx$

В Радиевом институте имени В.Г.Хлопина была разработана технология изготовления тонких плоскопараллельных кремниевых поверхностно-барьерных детекторов толщиной до  $7-10$  микрон и рабочей площадью около  $1 \text{ см}^2$ , обеспечивающая высокую однородность толщины кремниевых пластинок. Непосредственные измерения толщины отдельных детекторных пластин дали разброс ( $+0,1 - 0,2$ ) мкм на площади  $1 \text{ см}^2$ . Хорошая плоскопараллельность пластинок подтверждается также совпадением энергетических разрешений детекторов, полученных с  $\alpha$ -частицами  $\text{Thc}'$  и с ускоренными ионами  $^{20}\text{Ne}$ , на всей рабочей площади детектора и с коллимирующим отверстием диаметром  $1 \text{ мм}$ .

В таблице 1 приведены основные характеристики 3-х детекторов, которые испытывались на тяжелых ионах. Детекторы были изготовлены из кремния отечественного производства с удельным сопротивлением  $300-550 \text{ ом.см}$  и временем жизни носителей  $\tau - 30-50 \text{ мксек}$ .



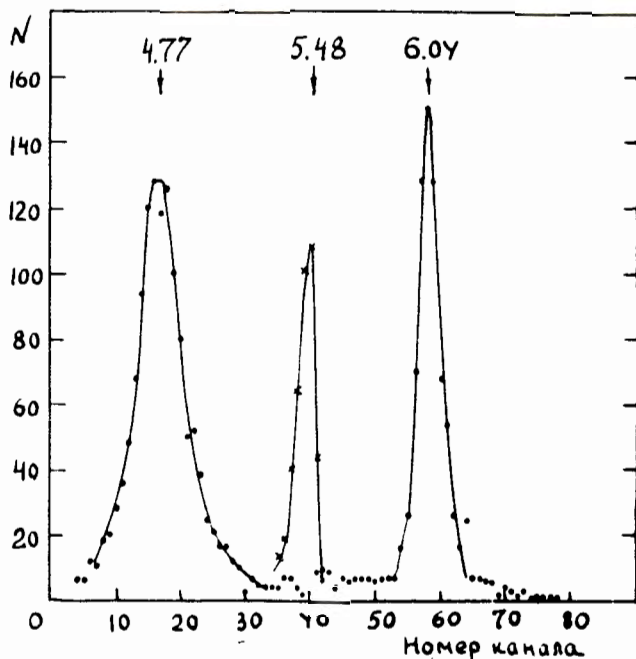


Рис.1. Спектр  $\alpha$ -частиц от источника Thc + Thc' для детектора толщиной 42,5 мкм.  $\alpha$ -линия  $^{241}\text{Am}$  с  $E_\alpha = 5,48$  Мэв приведена для калибровки шкалы.

На рис.1 приведен спектр  $\alpha$ -частиц Thc + Thc', полученный на детекторе №1 при облучении всей рабочей поверхности.  $\alpha$ -частицы с энергией 6,04 Мэв теряют в детекторе всю свою энергию,  $\alpha$ -частицы с энергией 8,78 Мэв теряют 4,77 Мэв. Для калибровки шкалы энергий приведены также  $\alpha$ -линия  $^{241}\text{A}$  с  $E_\alpha = 5,48$  Мэв.

### 3. Разрешающая способность тонких

#### детекторов на тяжелых ионах

Измерения разрешающей способности детекторов на тяжелых ионах проводились на выведенном пучке циклотрона У-300 ОИЯИ. Коллимированный пучок ионов падал в камере рассеяния на мишень из сусального золота толщиной около  $0,2 \text{ мг/см}^2$ . Детекторы устанавливались таким образом, чтобы в них попадали ионы, рассеянные под углом  $30^\circ$ . Для этого угла сечения неупругих процессов на несколько порядков ниже сечения упругого рассеяния. Угловая расходимость ионов, попадавших в детектор, не превышала  $3^\circ$ . Моноэнергетичность пучка ионов, измеренная с помощью толстого полупроводникового детектора, составляла  $\sim 1\%$ , однако, в случае ионов аргона она ухудшалась до  $3\%$ . Для уменьшения фона от электронов, выбитых пучком из мишени, перед детекторами устанавливалась заземленная алюминиевая фольга толщиной  $6 \text{ мк}$ . Использовалась возможность одновременного ускорения на циклотроне пар различных ионов с одинаковым отношением заряда к массе  $^{12}++\text{C}$  и  $^{18}++\text{O}$ ;  $^{15}++\text{N}$  и  $^{30}++\text{Ne}$ . В экспериментах применялась стандартная электронная аппаратура, разработанная для полупроводниковых детекторов в ЛЯР ОИЯИ. Спектр регистрировался на многоканальном амплитудном анализаторе "Тензор".

На рис.2 приведены спектры ионизационных потерь ионов  $^{15}\text{N}$  и  $^{30}\text{Ne}$  в детекторе №2, полученные в одном облучении. Загрузка детектора составляла  $\sim 400$  ионов в секунду. Цифры у стрелок указывают величины энергетических потерь ионов в детекторе, определенных из зависимости пробег-энергия <sup>1/</sup>.

В таблице 2 представлены экспериментальные данные по энергетическому разрешению трех тонких детекторов при облучении различными ионами. В таблицу включены также результаты для  $\alpha$ -частиц. The'. В последних столбцах таблицы приведены ожидаемые величины разрешений, полученные расчетом по формуле Крэншоу <sup>2/</sup>

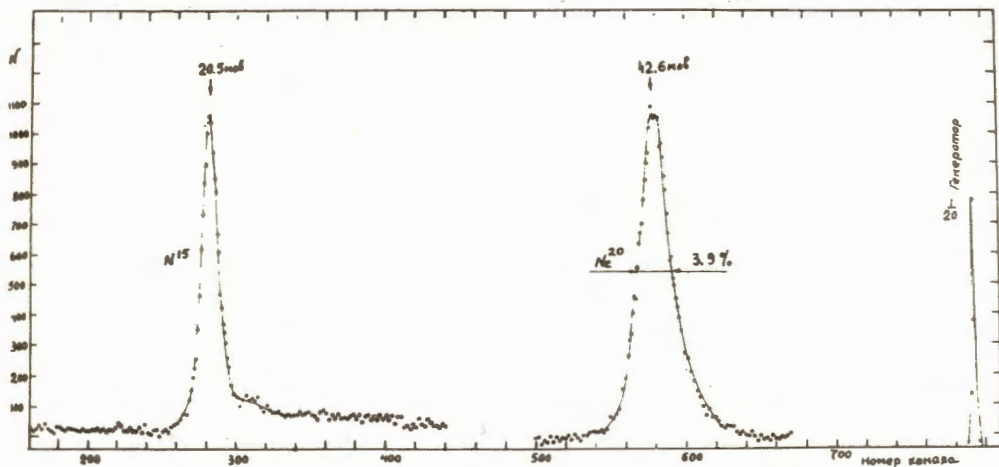


Рис.2. Спектр ионизационных потерь  $\Delta E$  ионов  $^{15}\text{N}$  и  $^{20}\text{Ne}$  для детектора толщиной 48,8 мкм. Цифры у стрелок дают потери энергии ионов в детекторах.

$$R\% = 2,6 \left[ \frac{W_{\text{Max}}}{\Delta E \ln(W_{\text{Max}} / I)} \right]^{1/2}$$

Здесь:  $W_{\text{Max}}$  — максимальная энергия, передаваемая ионом электрону,  
 $\Delta E$  — наиболее вероятная величина ионизационных потерь иона в детекторе,  
 $I$  — средний потенциал ионизации атомов кремния, равный по последним данным 173 эв <sup>/3/</sup>. Формула Крэншоу может быть хорошо аппрок-

симпирована выражением, в котором зависимость разрешения от частицы выражена в явном виде:

$$R_{\text{кЭВ}} = 15,5 \cdot z \sqrt{d},$$

$d$  – толщина детектора в микронах. Подобная прямая зависимость  $R(Z)$  вытекает из всех известных теоретических рассмотрений флуктуаций ионизационных потерь в тонких поглотителях /4-7/. Отличие определенного нами коэффициента 15,5 от обычно используемого 14,6 обусловлено выбором значения  $I = 173$  эв вместо универсального выражения  $I = 10 Z$  /8,9/.

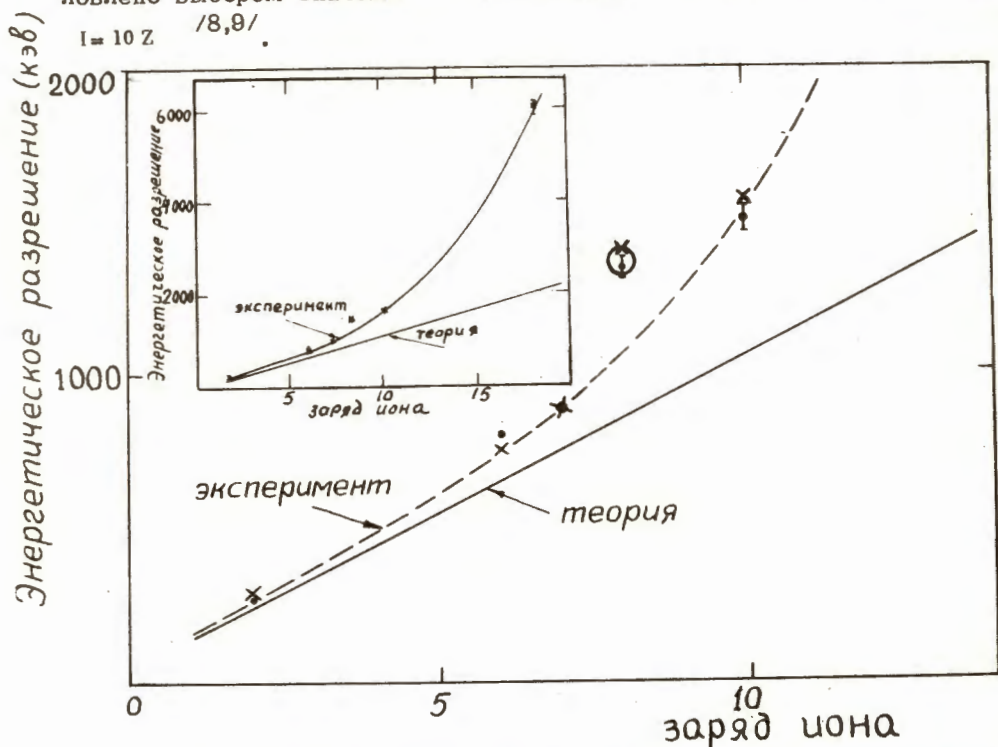


Рис.3. Энергетическое разрешение тонких детекторов в зависимости от  $Z$  иона. ● – детектор толщиной 48,6 мк, \* – детектор толщиной 42,5 мк, ○ – детектор толщиной 10 мк. Данные всех детекторов приведены к толщине 48,6 мк.



На рис.3 сделано сравнение между зависимостью разрешения от  $Z$ , даваемой формулой Крэншоу, и реально наблюдаемыми величинами.

Из данных, представленных в таблице 2 и на рисунке 3, можно сделать два вывода:

1) Разработанная в Радиовом институте им. В.Г.Хлопина методика изготовления полупроводниковых детекторов позволяет получать детекторы  $dE/dx$  для работы с тяжелыми ионами, не уступающие по своему разрешению лучшим образцам ионизационных камер /10,11/. Детекторы толщиной 40-50 мк позволяют в принципе разделять изотопы элементов до неона включительно. Относительное энергетическое разрешение детектора улучшается с увеличением его толщины пропорционально  $1/\sqrt{d}$ . Во многих случаях, при достаточной энергии ионов, этот фактор может быть использован для дальнейшего повышения разрешения.

2) Наблюдается возрастающее с  $Z$  расхождение между расчетными и экспериментальными значениями энергетического разрешения. Это расхождение проявляется во всех испытанных детекторах и поэтому не может быть случайным. Некоторое отклонение (примерно на 5 стандартных ошибок) от общего хода экспериментальной зависимости разрешения от  $Z$ , наблюдаемое для ионов  $^{18}O$ , возможно, связано с неупругими процессами. Следует заметить, что измерения на  $^{18}O$ , сделанные в разные дни и с разными детекторами, дали совпадающие результаты.

Обнаруженный факт существенного ухудшения энергетического разрешения тонких полупроводниковых детекторов для наиболее тяжелых ионов, по сравнению с предсказаниями теории, имеет важное значение, так как может поставить предел их использованию для идентификации изотопов тяжелее неона.

Можно указать факторы, которые не учитываются в формуле Креншоу (так же как и в других теориях флуктуаций ионизационных потерь), но в принципе могут вызвать ухудшение разрешения с ростом  $Z$  иона.

а) Многократное рассеяние иона при прохождении детектора приводит к удлинению его пути по сравнению с толщиной детектора  $d$ . Поскольку средний угол многократного рассеяния  $\theta$  растет с  $Z$ ,

$$\theta^2 \sim Z^2 d,$$

то дисперсия пути иона в детекторе будет возрастать с увеличением его заряда.

б) Сечение упругого рассеяния ионов на атомах кристаллической решетки детектора, которое приводит к большим потерям энергии иона по сравнению с рассеянием на электронах, также возрастает с  $Z$  и  $A$  иона.

Однако практическое совпадение результатов на детекторах разной толщины указывает на то, что процессы, для которых флуктуации энергетических потерь пропорциональны толщине, не играют существенной роли в эффекте сильного различия  $R_{\text{эксп.}}$  и  $R_{\text{теор.}}$  для тяжелых ионов.

Необходимы дальнейшие более детальные эксперименты для выяснения причин наблюдаемого эффекта.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Г.Н.Флеорову за постоянный интерес к работе, а также группе эксплуатации циклотрона У-300 во главе с Б.А.Загером за обеспечение бесперебойной работы ускорителя.

### Л и т е р а т у р а

1. L.C.Northcliffe, Ann. Rev. Nucl. Science 13, 67 (1963).
2. T.E.Cranshaw, Progr. in Nucl. Phys., 2, 271 (1952).
3. D.I.Skyrme, Nuclear Instr. 57, 61 (1967).
4. M.S.Livingston, H.Bethe, Rev. Mod. Phys., 9, 245 (1937).
5. J.E. Mollenauer et al, BNL 737 (T-266) 1962.
6. J.R.Comfort, J.F.Decker, E.T.Lynn, M.O.Scully, A.R.Quinton, Phys. Rev., 150, 249 (1966).
7. П.В.Вавилов, ЖЭТФ 32 (1957) 921.
8. B.I.Lalovic, V.S.Ajdacic, Electronique Nucleaire (Proceedings), Paris, 1964.
9. Ю.К.Акимов, А.И.Калинин, В.Ф.Кушвирук, Х.Юнгклауссен. "Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение", Атомиздат, Москва, 1967.
10. M.W.Sachs, C.Chasman, D.A.Bromley, Nucl. Instr. 41, 213 (1966).
11. J.E.Poth, Doctoral Dissertation, Yale University, 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел

14 августа 1968 года.

Таблица 1  
Характеристики детекторов.

№ детектора	Толщина, микрон	Рабочая площадь, мм <sup>2</sup>	Напряжение смещения, вольты	Обратный ток, мкА	Энергетическое разрешение на поглощение для К <sub>α</sub>	Э - величина энергетическое разрешение на поглощение для -частич с по всей рабочей поверхности, МэВ
1	42,5	64	16	0,51	40	4,77
2	48,6	64	18	0,70	40	6,50
3	10,0	12 "	3	0,1	-	1,01

12

х) Активная площадь детектора толщиной 10 мк была сделана меньшей для сохранения той же емкости, что и у более толстых детекторов.

Таблица 2.

Энергетическое разрешение R толстых детекторов на тяжелых ионах и α - частицах Т<sub>0</sub>

Тип частицы	Энергия иона К <sub>α</sub> в мэВ	Детектор № 2 - 48,6 мк		Детектор № 1 - 42,5 мк		Детектор № 3 - 10 мк				
		потери энергии : МэВ	разрешение % : экспер. теория	потери энергии : МэВ	разрешение % : экспер. теория	потери энергии : МэВ	разрешение % : экспер. теория			
<sup>4</sup> He	8,78	6,50	4,4	3,8	4,8	5,0	4,4	1,01	6,6	9,6
<sup>12</sup> C	77,3	21,4	3,5	3,1	18,1	4,1	3,3	-	-	-
<sup>15</sup> N	140,0	20,4	4,8	3,6	17,6	4,7	3,9	-	-	-
<sup>18</sup> O	114,2	38,0	3,7	2,3	32,9	3,8	2,4	7,1	8,5	5,4
<sup>80</sup> Br	183,6	42,6	3,7	2,5	36,0	3,9	2,8	-	-	-
<sup>140</sup> Ar	283,0	-	-	-	109,0	5,2	1,6	-	-	-

13

K<sub>0</sub> - начальная энергия падающих на детектор ионов

α - энергетическое разрешение на поглощение, определенное как ширина кривой распределения энергетических потерь на половине максимума. Ошибки определены в закл. составляют ±(0,1-0,2).