

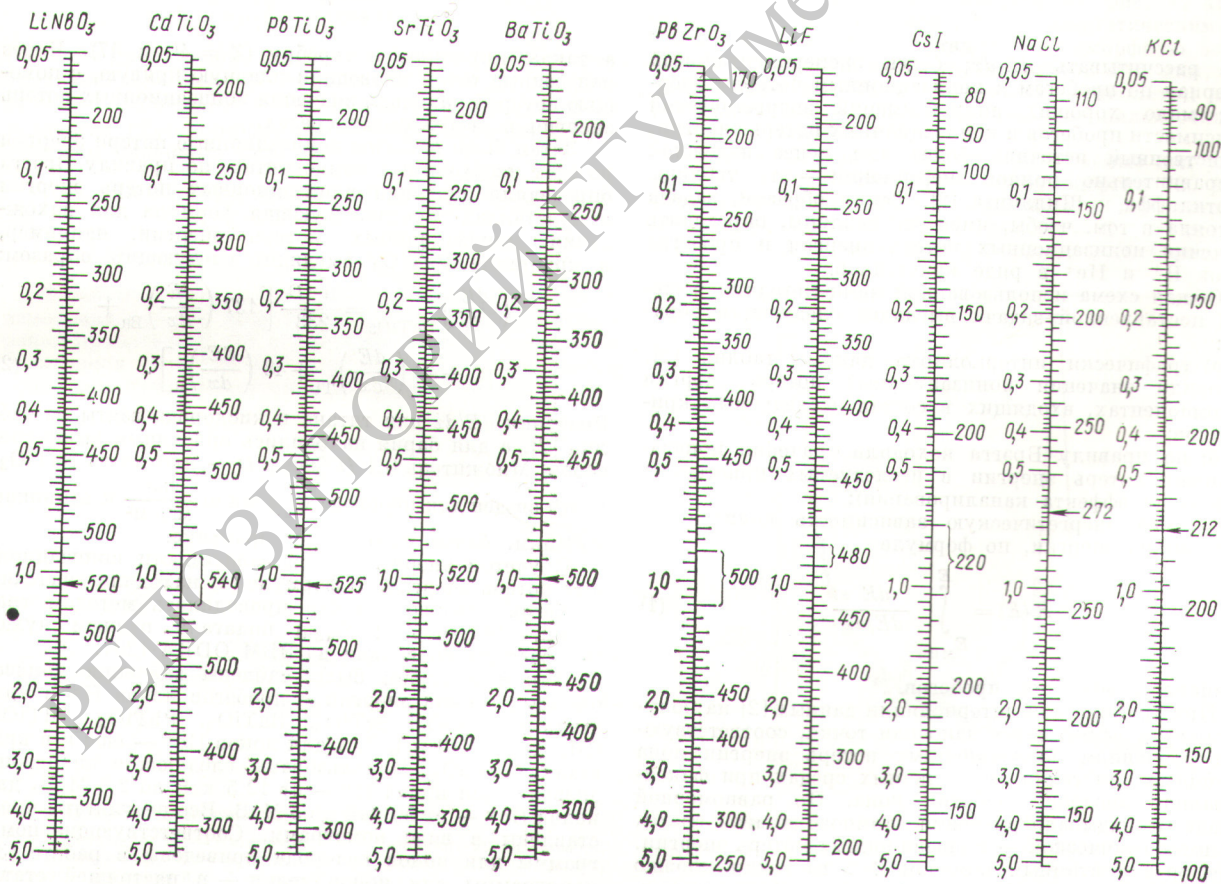
Ионизационные потери энергии и пробеги альфа-частиц в ионных кристаллах

ПОТЕТЮНКО Г. Н., ШИПАТОВ Э. Т.

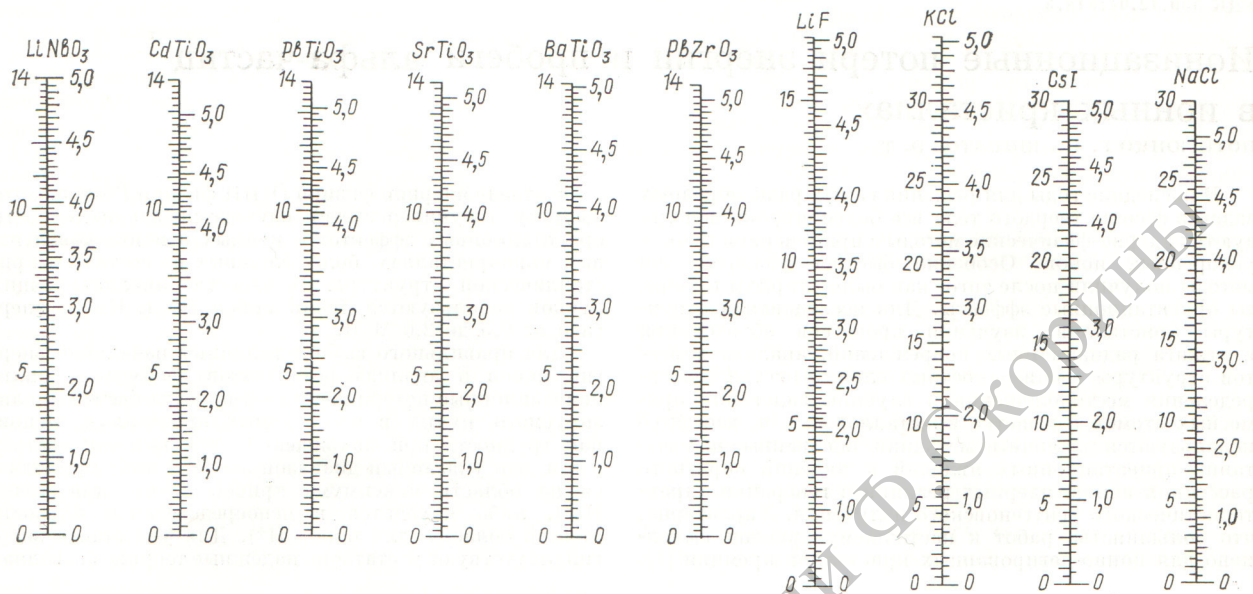
В последние годы для решения самых разнообразных задач в физике твердого тела все более широко используются ядерно-физические методы с применением пучков ускоренных ионов. Особенно быстрое развитие эти методы получили после того, как были открыты и поняты ориентационные эффекты. Для исследования структуры кристаллов, изучения процессов образования и отжига радиационных повреждений, анализа дефектов структуры в поверхностных слоях кристаллов, определения местоположения и глубины залегания примесных атомов в решетке кристаллов и т. п. все шире используются различные методики, основанные на сочетании ориентационных явлений и явлений обратного рассеяния ионов, ядерных реакций и генерации характеристического рентгеновского излучения. Характерно, что большинство работ к настоящему времени выполнено для ионно-легированных кристаллов кремния [1].

В отделе ядерной физики (НИИ физики Ростовского-на-Дону госуниверситета) изучаются закономерности ориентационных эффектов в ионных и ионно-ковалентных монокристаллах, более сложных по составу и кристаллической структуре. В качестве анализирующих пучков используются пучки ионов H^+ и He^+ с энергией от 0,5 до 2,0 МэВ.

Для правильного выбора величины начальной энергии ионов и анализа результатов необходимо знать ионизационные потери энергии и пробеги частиц анализируемого пучка в исследуемых кристаллах. Основная трудность при нахождении этих величин состоит в том, что указанный диапазон энергий либо приходится на область максимума кривой dE/dx (для ионов He^+), либо находится в непосредственной близости от этой области (для ионов H^+). Для указанных энергий отсутствуют достаточно надежные теории, позволяющие



Р и с. 1. Ионизационные потери энергии (числа слева от шкалы — E , МэВ; справа — dE/dx , кэВ/ μm)



Р и с. 2. Пробеги α -частиц (числа слева от шкалы — R , мкм; справа — E , МэВ)

щие рассчитывать dE/dx ; беден экспериментальный материал по пробегам и ионизационным потерям энергии; мало хороших аппроксимаций энергетической зависимости пробегов и ионизационных потерь энергии. Единственный источник более или менее надежной и сравнительно полной информации — это таблицы Нортклиффа и Шиллинга [2]. Таким образом, задача состояла в том, чтобы, имея эти таблицы, определить значения ионизационных потерь энергии и пробегов ионов H^+ и He^+ в ряде кристаллов.

Общая схема использованной нами методики решения поставленной задачи выглядит следующим образом:

а) графически интерполируя данные таблиц [2], находили значения ионизационных потерь энергии в компонентах, входящих в состав исследуемых кристаллов;

б) по правилу Брэгга находили значения ионизационных потерь энергии в исследуемых кристаллах (без учета эффекта каналирования);

в) имея энергетическую зависимость ионизационных потерь энергии, по формуле

$$R(E) = \int_{E_{\min}}^E \frac{dE}{dE/dx} \quad (1)$$

вычисляли значения пробегов.

При графической интерполяции данных [2] на поллогарифмическую сетку наносили точки, соответствующие значениям ионизационных потерь энергии иона (водорода или гелия) в различных средах при фиксированном значении энергии иона. По равномерной шкале откладывали значения атомного номера среды, по логарифмической — ионизационных потерь энергии. Для сред с атомным номером $Z > 10$ точки хорошо укладывались на плавную кривую. Исключение составляли лишь точки, соответствующие благородным газам,

а также цирконию и серебру ($Z = 40$ и 47). Через нанесенные точки проводили плавную кривую, с помощью которой находили значения ионизационных потерь энергии в необходимых средах.

Затем были найдены ионизационные потери энергии во всех необходимых компонентах, по правилу Брэгга определяли значения ионизационных потерь энергии в кристаллах. Соответствующая формула для нахождения ионизационных потерь энергии, например, в кристалле $BaTiO_3$ выглядит следующим образом:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{BaTiO_3} = \frac{0,1D}{233} \left[137 \left(\frac{dE}{dx}\right)_{Ba} + 48 \left(\frac{dE}{dx}\right)_{Ti} + 48 \left(\frac{dE}{dx}\right)_O \right]. \quad (2)$$

Значения dE/dx для титана и кислорода взяты из таблиц [2], а для бария находились описанным выше способом. Множитель $0,1 D$ (здесь D — плотность $BaTiO_3$, $г/см^3$) введен для перехода от единиц $\frac{кэВ}{мг/см^2}$ к единицам $кэВ/мкм$, более удобным на практике.

С учетом энергетической зависимости ионизационных потерь энергии по формуле (1) находили значения пробегов. Интегрирование проводилось методом трапеций. Значение $R(E_{\min})$ полагали равным нулю. Все расчеты проводили на ЭВМ ODR-1204.

Таким способом были найдены значения ионизационных потерь энергии и пробегов ионов H^+ в кристаллах $PbZrO_3$, $SrTiO_3$, $BaTiO_3$, $PbTiO_3$, $CdTiO_3$, CsI , $NaCl$, KCl и LiF , а для ионов He^+ — еще и в кристалле $LiNbO_3$. Использованы следующие диапазоны энергии: для ионов H^+ — от 12,5 кэВ до 2,5 МэВ, для ионов He^+ — от 50 кэВ до 5 МэВ. Все результаты представлены в виде номограмм. Соответствующие номограммы для ионов водорода приведены в работе [3], номограммы для ионов гелия — в настоящей статье (рис. 1 и 2). Погрешность полученных данных состав-

ляет приблизительно 15—20%. Из номограмм видно, что как в случае ионов водорода, так и ионов гелия для трехкомпонентных кристаллов с высокой плотностью упаковки значения ионизационных потерь энергии выше и соответственно пробеги ионов меньше, чем в двухкомпонентных кристаллах.

Поступило в Редакцию 10/IX 1975 г.

УДК 539.122:539.124.6:621.384.6

Пучок монохроматических аннигиляционных гамма-квантов на линейном электронном ускорителе с энергией 2 ГэВ

ШРАМЕНКО Б. И., БОЧЕК Г. Л., ВИТЬКО В. И., ГРИШАЕВ И. А., КУЛИБАБА В. И., КОВАЛЕНКО Г. Д., МОРОХОВСКИЙ В. Л.

Настоящая работа проведена для отработки методики получения на линейном электронном ускорителе монохроматических аннигиляционных γ -квантов и измерения их параметров. Энергия аннигиляционного γ -кванта K связана с углом наблюдения Θ и энергией позитрона E следующим образом:

$$K = \frac{m}{1 - \sqrt{(E-m)/(E+m)} \cos \Theta}; \quad (\hbar = c = 1) \quad (1)$$

где m — масса покоя позитрона. Энергетический разброс аннигиляционных γ -квантов зависит от величин разброса первичного пучка позитронов по углу (S_Θ) и энергии (S_E), а также от величины вырезаемого детектором линейного угла $\Delta\Theta$:

$$\Delta K = [a^2 S_E^2 + b^2 S_\Theta^2 + (\Delta\Theta)^2 (b^2/12)]^{1/2}, \quad (2)$$

где

$$a = K^2 \cos \Theta / (E + m)^2 \beta, \quad b = -\sin \Theta K^2 (\beta/m).$$

В работе [1] приведены предварительные результаты измерения спектра аннигиляционных γ -квантов. Измерения проводились под углом к направлению движения позитронов $\Theta = 1,6 \cdot 10^{-2}$ рад, который обеспечивался поворотом пучка позитронов магнитным полем.

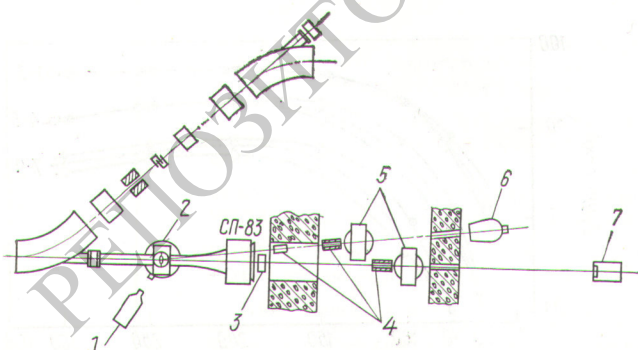


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — телекамера; 2 — гониометр; 3 — ионизационная камера; 4 — коллиматор; 5 — очищающие магниты; 6 — спектрометр полного поглощения; 7 — квантометр

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мейер Дж., Эриксон Л., Дэвис Дж. Ионное легирование полупроводников. М., «Мир», 1973.
2. Northcliffe L., Schilling R. «Nuclear Data», 1970, v. A7, N 3—4.
3. Потетюнок Г. Н., Шипатов Э. Т. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 2, с. 120.

В настоящем сообщении приведены новые данные о спектральном распределении квазимонохроматических аннигиляционных γ -квантов, полученных на этом ускорителе. Измерения выполнены в новых экспериментальных условиях на специально созданном фотонном канале, ось которого составляет угол $\Theta = 2 \cdot 10^{-2}$ рад по отношению к оси ускорителя.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Позитронный пучок с энергией 1 ГэВ и энергетическим разбросом $\Delta E/E = 2\%$ направлялся на аморфную бериллиевую мишень-аннигилятор толщиной 230 мкм, расположенную на выходе ускорителя (гониометр), после взаимодействия с мишенью пучок отклонялся очищающим магнитом (СП-83).

Аннигиляционные γ -кванты, излучаемые под углом $\Theta = 2 \cdot 10^{-2}$ рад, что соответствует энергии 720 МэВ, коллимировались двумя свинцовыми коллиматорами, которые вырезали телесный угол $d\Omega = 2 \cdot 10^{-6}$ ср. Линейный угол коллимации $\Delta\Theta$ равен $7 \cdot 10^{-4}$ рад, что

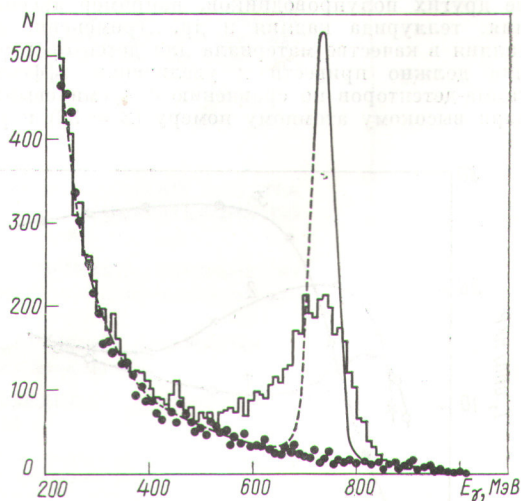


Рис. 2. Спектр аннигиляционных γ -квантов:

— — — — —; ● — измеренные спектры γ -квантов от позитронов и электронов соответственно; — — — — — спектр аннигиляционных γ -квантов с учетом поправок на энергетическое разрешение спектрометра