

## ИОНИЗАЦИОННЫЕ И РАДИАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПОЗИТРОНОВ В МОНОКРИСТАЛЛЕ КРЕМНИЯ

АДЕИШВИЛИ Д. И., ВИТЬКО В. И., ГАНЕНКО В. Б., ГОНЧАРОВ И. Г.,  
ЖЕБРОВСКИЙ Ю. В., КОВАЛЕНКО Г. Д., КОЛЕСНИКОВ Л. Я., КУЛИБАБА В. И.,  
РУБАШКИН А. Л., ШРАМЕНКО Б. И.

ХАРЬКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ АН УССР

(Поступила в редакцию 30 июня 1987 г.)

Исследованы спектральные распределения ионизационных и радиационных потерь энергии позитронов с энергией 1200 МэВ в ориентированном осью [111] и разориентированном кристалле кремния толщиной 0,16 см. При выполнении условий осевого каналирования ионизационные потери позитронов уменьшаются на 20% по сравнению с разориентированным. В спектральном распределении радиационных потерь наблюдается максимум при энергии 3,5 МэВ. Показано, что положение максимума в спектральном излучении позитронов пропорционально начальной энергии в степени  $3/2$ .

В аморфной среде различие ионизационных и радиационных потерь энергии для электронов и позитронов незначительно. В монокристаллических средах на движение электронов и позитронов влияют плотно упакованные ряды и плоскости. При малых углах между импульсом частицы и кристаллографической осью или плоскостью частицы захватываются в связанное движение и возникает явление каналирования. Из-за различия в знаках заряда каналирование электронов и позитронов происходит по-разному. Позитроны, отталкиваясь от положительно заряженных рядов и плоскостей атомов, движутся в основном вдали от ядер атомов, тогда как электроны движутся в основном вблизи ядер. Такое различие в движениях ведет к различиям в величинах потерь энергии для электронов и позитронов.

Нами исследовалось влияние каналирования позитронов на величины ионизационных и радиационных потерь. Настоящая работа является продолжением работы [1], в которой исследовались ионизационные и радиационные потери релятивистских электронов в монокристалле кремния. Сравнение данных настоящей работы и работы [1] позволит оценить влияние знака заряда на величины потерь энергии.

Методика эксперимента, экспериментальное оборудование такие же, как и в предыдущем эксперименте. Позитронный пучок получался конвертированием основного электронного пучка с энергией  $\sim 250$  МэВ и затем ускорялся до энергии  $E_0 = 1200$  МэВ. Размер пучка на мишени  $\varnothing 3,5$  мм, расходимость  $\sim 10^{-4}$  рад и энергетический разброс 0,2%. В качестве мишени использовался монокристалл кремния толщиной  $0,16 \pm \pm 0,001$  см, который одновременно являлся и полупроводниковым детектором.

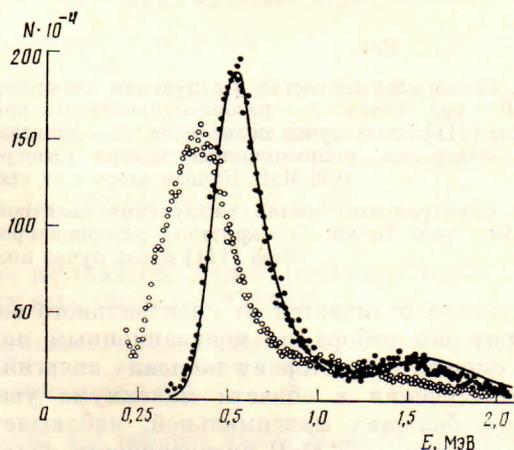
### Ионизационные потери

Спектры ионизационных потерь энергии позитронов в ориентированном и разориентированном кристалле показаны на рис. 1. По оси ординат отложено число частиц  $N$  в интервале энергий  $\Delta E$ , определяемом шириной канала анализатора, равном 4,8 кэВ, нормированное на суммарное число частиц, по оси абсцисс — энергия потерь  $E$ . Сплошной кривой на рис. 1 показано расчетное распределение потерь энергии, полученное из распределения Ландау [2], с учетом энергетического разрешения де-

тектора (которое в данном случае равно 55 кэВ) и наложений импульсов в детекторе. Увеличение числа частиц в области энергий, больших 1 МэВ, обусловлено наложением импульсов от позитронов, временной интервал между которыми  $< 1$  мкс. Расчетная и экспериментальная кривые нормировались в максимуме спектра. Для разориентированного кристалла расчетная форма кривой хорошо согласуется с экспериментальной.

Для позитронов, движущихся вдоль оси [111], максимум распределения смещается в область меньших энергий. Наиболее вероятные потери энергии уменьшаются по сравнению с потерями в разориентированном кристалле примерно на 20% и равны 0,42 МэВ. В разориентированном кристалле наиболее вероятные потери энергии равны 0,514 МэВ. Увели-

Рис. 1. Ионизационные потери позитронов с энергией 1200 МэВ в монокристалле кремния толщиной 0,16 см. Точки: ● — разориентированный кристалл, ○ — кристалл ориентирован осью [111] вдоль пучка позитронов. Кривая — расчет с учетом наложений и энергетического разрешения детектора



чение ширины распределения для ориентированного кристалла обусловлено деканализированием позитронов в процессе их движения через кристалл.

#### Радиационные потери

На рис. 2 показаны спектры излучения позитронов в диапазоне энергий 1,5—25 МэВ. При измерении спектральных характеристик излучения позитронов с помощью спектрометра полного поглощения на базе CsJ(Tl) полупроводниковый кристалл-детектор работал в режиме счетчика позитронов, и сигнал с него использовался для управления амплитудным анализатором.

На рис. 2 показаны спектры излучения позитронов с энергией 1200 МэВ в монокристалле кремния для трех случаев: 1) ось кристалла [111] совпадает с направлением пучка; 2) ось кристалла [111] совпадает с направлением пучка, но регистрируется излучение только тех позитронов, которые потеряли энергию на ионизацию  $> 0,29$  МэВ и  $< 0,36$  МэВ; 3) разориентированный кристалл.

По оси ординат отложена интенсивность фотонов в телесном угле  $\Omega = 25 \cdot 10^{-6}$  ср (угол коллимации  $\theta_{\text{кол}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  рад) на один падающий электрон; по оси абсцисс — энергия фотонов. Расчетная кривая, приведенная на рис. 2, получена в рамках теории когерентного тормозного излучения [3] с учетом расходимости пучка, многократного рассеяния позитронов в мишени и геометрии эксперимента. Расчетная кривая находится в хорошем согласии с экспериментальной как по форме, так и по абсолютному значению. Для ориентированного кристалла наблюдается увеличение интенсивности излучения во всем измеренном диапазоне энергий. Максимум интенсивности находится при энергии  $E = 3,8$  МэВ.

Когда ось кристалла [111] совпадает с направлением пучка позитронов и регистрируется излучение только тех позитронов, которые потеряли энергию на ионизацию в диапазоне 0,29—0,36 МэВ, можно считать, что это излучение обусловлено позитронами, каналирующими на всей толщине кристалла. Как видно из рис. 2, спектральный состав излучения

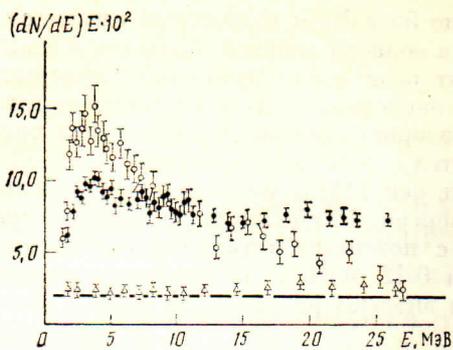


Рис. 2

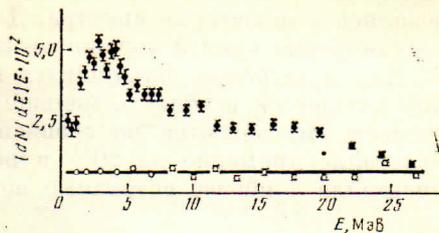


Рис. 3

Рис. 2. Спектральный состав  $\gamma$ -излучения позитронов в кристалле кремния,  $\theta_{\text{кол}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  рад. Точки:  $\Delta$  – разориентированный кристалл,  $\bullet$  – кристалл ориентирован осью [111] вдоль пучка позитронов,  $\circ$  – кристалл ориентирован осью [111] вдоль пучка позитронов, ионизационные потери позитронов лежат в диапазоне 0,29–0,36 МэВ. Кривая здесь и на рис. 3 – расчет

Рис. 3. Спектральный состав  $\gamma$ -излучения позитронов в кристалле кремния,  $\theta_{\text{кол}} = 8,37 \cdot 10^{-4}$  рад. Точки:  $\circ$  – кристалл разориентирован;  $\bullet$  – кристалл ориентирован осью [111] вдоль пучка позитронов

существенно отличается от спектрального состава излучения позитронов без критерия отбора по ионизационным потерям. Максимум интенсивности смещается в сторону меньших энергий и равен 3,5 МэВ. Интенсивность излучения в области максимума увеличивается, а для энергий фотонов, больших максимальной, наблюдается уменьшение излучения, и для энергии  $\sim 25$  МэВ интенсивности излучений для ориентированного и разориентированного кристаллов сравниваются. Это говорит о том, что излучение надбарьерных позитронов более жесткое, чем каналированных. Как следует из работы [4], для каналированных позитронов наблюдается уменьшение интенсивности излучения фотонов с энергией больше 100 МэВ по сравнению с интенсивностью излучения позитронов в разориентированном кристалле. Механизм этого явления подробно обсуждается в экспериментальных и теоретических работах [5–7].

На рис. 3 приведены спектральные характеристики излучения позитронов в ориентированном и разориентированном кристалле, измеренные в телесном угле  $28 \cdot 10^{-7}$  ср (угол коллимации  $\theta_{\text{кол}} = 8,37 \cdot 10^{-4}$  рад). Сплошная кривая – расчет с учетом параметров пучка и геометрии эксперимента. Для разориентированного кристалла наблюдается хорошее согласие с расчетом. Максимум в спектре излучения для ориентированного кристалла наблюдается при энергии фотонов  $E = 3,5$  МэВ, как и в случае неколлимированного излучения позитронов, которые потеряли энергию на ионизацию в диапазоне 0,29–0,36 МэВ. В максимуме спектра для коллимированного излучения обнаруживается расщепление максимума, которое ранее наблюдалось в работе [8]. При  $E = 25$  МэВ интенсивность излучения для ориентированного кристалла совпадает с интенсивностью из разориентированного кристалла.

Положения максимумов в спектрах коллимированного излучения позитронов, падающих вдоль оси [111] кристалла кремния, для трех энергий следующие:

$E_0$ , МэВ	800 [9]	1050 [8]	1200
$E$ , МэВ	1,8	2,5	3,48
$E/E_0^{3/2} \cdot \text{const}$	2,51	2,31	2,65

Можно считать, что энергия в максимуме излучения пропорциональна  $E_0^{3/2}$ , что согласуется с теорией излучения при осевом каналировании [10].

Таким образом, ионизационные потери позитронов в толстом кристалле в отличие от электронов зависят от ориентации кристалла. Интенсивность излучения позитронов в максимуме спектра при их движении вдоль

оси [111] примерно такая же, как и электронов, но радиационные потери энергии позитронов существенно меньше, чем электронов.

В заключение считаем приятным долгом выразить благодарность В. И. Артемову, Ф. А. Пееву и персоналу ускорителя под руководством В. И. Кобезского за получение пучка позитронов на ускорителе электронов ЛУ-2 ГэВ.

#### Литература

1. Адейшвили Д. И., Бочек Г. Л., Витко В. И. и др. // ЯФ. 1984. Т. 40. С. 318.
2. Landau L. // J. Phys. 1944. V. 8. P. 201.
3. Тер-Микаелян М. Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Ереван: Изд. АН АрмССР, 1969.
4. Гришаев И. А., Коваленко Г. Д., Шраменко Б. И. // ЖЭТФ. 1977. Т. 72. С. 437.
5. Бочек Г. Л., Гришаев И. А., Коваленко Г. Д., Кулибаба В. И. // Письма в ЖЭТФ, 1980. Т. 33. С. 380.
6. Котаров Ф. Ф. // Phys. Stat. Sol. (B). 1979. V. 96. P. 555.
7. Wedell R. // Radiat. Eff. 1978. V. 38. P. 165.
8. Адейшвили Д. И., Бочек Г. Л., Витко В. И. и др. // Укр. физ. журн. 1985. Т. 30. С. 1654.
9. Витко В. И., Гришаев И. А., Коваленко Г. Д. // Тр. XI Всесоюз. совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами, М., 30 мая - 1 июня 1982. М.: Изд. МГУ, 1982. С. 336.
10. Авакян Л. Л., Жеваго Н. К., Ян Ши // ЖЭТФ. 1982. Т. 82. С. 573.

#### RELATIVISTIC POSITRON IONIZATION AND RADIATION ENERGY LOSSES IN SILICON MONOCRYSTAL

ADEISHVILI D. I., VITKO V. I., GANENKO V. B., GONCHAROV I. G., ZHEBROVSKY Yu. V., KOVALENKO G. D., KOLESNIKOV L. Ya., KULIBABA V. I., RUBASHKIN A. L., SHRAMENKO B. I.

Spectral distributions of ionization and radiation energy losses by 1200-MeV positrons are studied in 0.16-cm thick silicon crystal which is either disoriented or oriented with respect to the [111] axis. If the axial channelling conditions are satisfied, then the positron ionization losses decrease by 20% as compared to the disoriented crystal. The spectral of the radiation losses exhibits a maximum at 3.5 MeV. The position of the maximum in the spectrum emitted by the positrons is proportional to the initial energy to the power  $3/2$ .