

*И.И.И.И.*

В.И. Телегин, А.М. Канлоев,  
Ф.Р. Кунгуров

ИАЭ-4944/1

**АНИЗОТРОПИЯ  
КОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЛЕПТОНОВ  
ПРИ АКСИАЛЬНОМ КАНАЛИРОВАНИИ**

Москва - 1989

Ключевые слова: электроны, позитроны, высокие энергии, монокристаллы, каналирование.

Исследуется вклад когерентного и многократного рассеяния релятивистских лептонов, прошедших через тонкие кристаллы в режиме каналирования, в их угловое распределение. Исследование проводилось путем численного интегрирования уравнений движения для большого числа частиц. Показано, что в кристаллах с толщиной меньше длины деканалирования определяющую роль в формировании распределения по углам вылета играет когерентное рассеяние частиц цепочками атомов. Влияние многократного рассеяния на угловое распределение пренебрежимо мало.

The contribution of the coherent and incoherent scattering of relativistic leptons passed through thin crystals in the channeling mode to their angular distribution is considered. The investigation was carried out by numerical integration of the motion equations for a great number of particles. It is shown that in the crystals with a thickness smaller than the dechanneling length the determining role in formation of distribution over the exit angles is played by the coherent scattering of particles by the atom chains. The effect of the multiple scattering on the angular distribution is negligibly small.

При исследовании характеристик прошедших через кристаллы под небольшими углами относительно кристаллографических осей однородных пучков электронов и позитронов было обнаружено формирование асимметрии в угловом распределении частиц [1—3]. В последующих экспериментальных исследованиях электронов [4,5] было установлено, что угловое распределение частиц после прохождения через ориентированный монокристалл принимает своеобразную форму «рогалика» (*doughnut* [6]). Теоретическое исследование углового распределения прошедших через кристалл электронов и позитронов, проведенное для монокристалла золота толщиной 600 Å при энергии частиц 1 МэВ и кристаллографического направления  $\langle 111 \rangle$  [7], показало зависимость формы углового распределения от угла разориентации между осью симметрии падающего пучка и кристаллографической осью. Результаты детальных исследований зависимости формы углового распределения в пучке  $\pi^-$ - мезонов с энергией 15 ГэВ от толщины монокристалла кремния и угла разориентации между осью симметрии падающего пучка и кристаллографической осью  $\langle 110 \rangle$  приведены в [6].

Проведенные исследования позволили выявить главные особенности в форме углового распределения прошедших через кристалл частиц и условия их появления. Однако определение относительного вклада различных факторов, влияющих на распределение частиц, при этом оказывается затруднительным вследствие большой толщины кристаллов. Численные расчеты [7], выполненные с использованием метода бинарных столкновений, также не позволяют отделить вклад усредненного электростатического потенциала цепочек атомов осевых каналов и многократного рассеяния быстрых частиц на тепловых колебаниях атомов решетки и их электронных оболочках. В данной работе приводятся результаты исследования этого вопроса.

Влияние усредненного потенциала атомных цепочек осевого канала монокристалла, или когерентного рассеяния, на угловое распределение не связанных в каналах лептонов изучалось путем численного интегрирования уравнений движения большого числа частиц, моделировавших падающий пучок. Расчеты проводились для параллельного пучка частиц с энергией 500 МэВ, падающих на поверхность монокристалла кремния, ориентированного осью  $\langle 111 \rangle$ , с углами разориентации  $\psi_c$  и  $2\psi_c$ , где  $\psi_c$  — критический угол каналирования.

В случае выбранных для расчетов значений энергии частиц и материала монокристалла применимо классическое описание

движения частиц. В отсутствие многократного рассеяния быстрой частицы проекция ее радиуса-вектора на плоскость, перпендикулярную оси канала, удовлетворяет системе уравнений

$$m\ddot{r}_{\perp} = -\frac{\partial U}{\partial r_{\perp}}, \quad (1)$$

где  $m = \gamma m_0$  — релятивистская масса частицы ( $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  — фактор Лоренца);  $U(\vec{r}_{\perp})$  — потенциальная энергия частицы в электростатическом поле внутри кристалла. В качестве аппроксимации электростатического потенциала атома использовался потенциал Мольера. Электростатический потенциал отдельной цепочки атомов рассчитывался усреднением потенциала атома в направлении кристаллографической оси и по поперечным колебаниям атомов при комнатной температуре. С учетом многократного рассеяния после каждого шага интегрирования по времени системы уравнений (1) с использованием датчика случайных чисел рассчитывался угол многократного рассеяния и выполнялась корректировка импульсов частиц. Значения координат и импульсов частиц на поверхности кристалла определялись из условия однородности распределения частиц в падающем пучке.

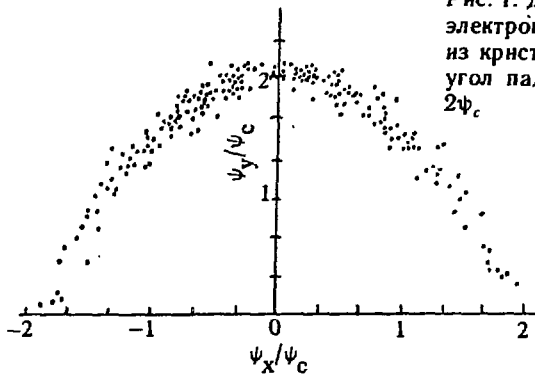


Рис. 1. Двумерное угловое распределение электронов с энергией 500 МэВ на выходе из кристалла кремния толщиной 10 мкм; угол падения на поверхность кристалла  $2\psi_c$ .

Результаты расчетов углового распределения электронов с энергией 500 МэВ, падающих на поверхность кристалла под углом  $2\psi_c = 1,2 \cdot 10^{-3}$  рад относительно кристаллографической оси  $\langle 111 \rangle$ , после прохождения монокристалла кремния толщиной 10 мкм приведены на рис. 1. Начальные импульсы всех частиц параллельны плоскости  $ZY$ . Расчет проведен без учета многократного рассеяния частиц, и все особенности углового распределения определяются когерентным рассеянием электронов суммарным потенциалом цепочек атомов. Угловое распределение симметрично относительно плоскости  $ZY$ . Рассеяние частиц происходит по азимутальному углу  $\varphi$  относительно кристаллографического направления.

Графики числа частиц, имеющих заданные координаты

$\psi_x$  и  $\psi_y$ , приведены на рис. 2. Видно, что число частиц с большими значениями азимутального угла  $\varphi$  быстро уменьшается с ростом угла, так что углы вылета большей части частиц близки к углу влета падающего пучка.

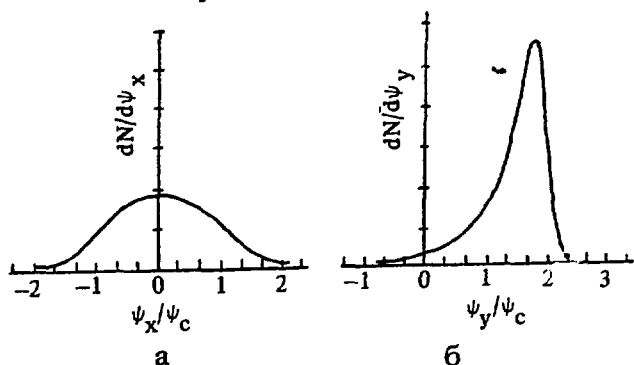


Рис. 2. Проекция углового распределения частиц на ось  $\psi_x$  (а) и  $\psi_y$  (б)

Отметим, что идентичный описанному выше расчет проведен также с учетом многократного рассеяния электронов на тепловых колебаниях решетки кристалла и электронных оболочках. При выбранной толщине кристалла результаты обоих расчетов практически не различаются. Таким образом, результаты расчетов показывают, что в формировании углового распределения частиц при прохождении через тонкий монокристалл определяющую роль играет когерентное рассеяние частиц усредненным потенциалом цепочек атомов.

При углах падения электронного пучка на поверхность кристалла порядка  $\psi_c = 0,6 \cdot 10^{-3}$  рад угловое рассеяние частиц резко возрастает. В этом случае при выбранной толщине кристалла 10 мкм угловое распределение частиц на выходе из кристалла имеет кольцеобразную форму. С увеличением угла разориентации угловое рассеяние быстро уменьшается и распределение частиц практически не отличается от аксиально-симметричного относительно оси пучка.

Расчеты, проведенные для позитронных пучков в аналогичных условиях, также показывают определяющее влияние когерентного рассеяния частиц на цепочках кристалла в формировании их углового распределения. На рис. 2 приведено угловое распределение позитронов с энергией 500 МэВ, падающих на поверхность кристалла кремния под углом  $\psi_c = 0,6 \cdot 10^{-3}$  рад относительно кристаллографической оси  $\langle 111 \rangle$ . Частицы испытывают сильное угловое рассеяние, так что распределение имеет вид кругового кольца. Распределение плотности частиц по азимутальной координате  $\varphi$  неоднородно (рис. 4), большая часть частиц сохраняет направление импульса, близкое к первоначальному. С увеличением угла разориентации угловое рассеяние позитронов также быстро

уменьшается и угловое распределение принимает форму кольцевого сегмента.

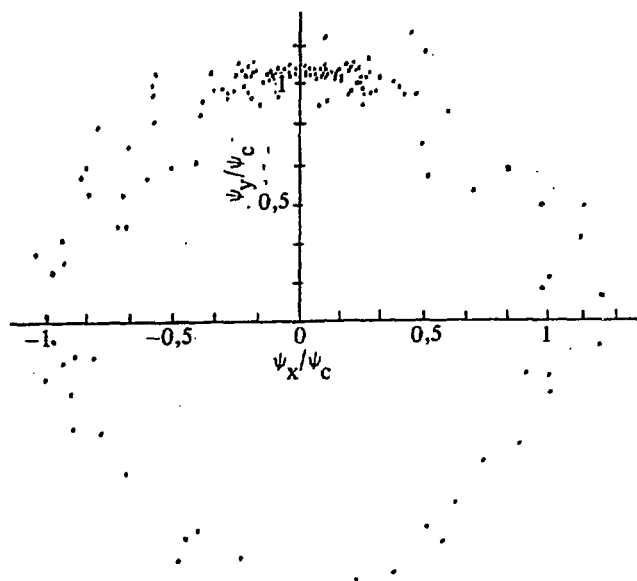


Рис. 3. Двумерное угловое распределение позитронов с энергией 500 МэВ на выходе из кристалла кремния толщиной 10 мкм; угол падения на поверхность кристалла  $\psi_c$

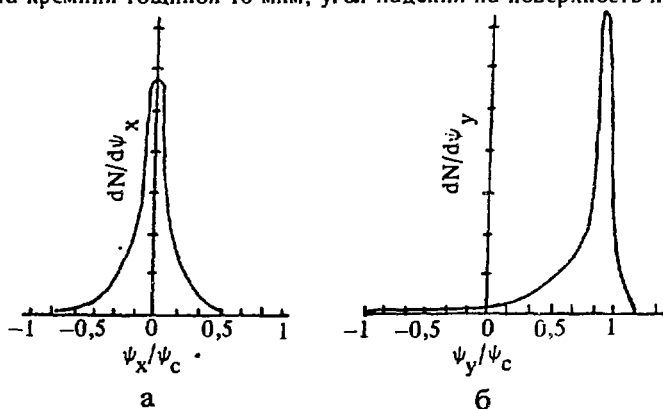


Рис. 4. Проекция углового распределения на ось  $\psi_x$  (а) и  $\psi_y$  (б)

Таким образом, результаты расчетов показывают, что угловое распределение электронов и позитронов в виде кольцевых сигментов образуется вследствие когерентного рассеяния частиц электростатическим полем цепочек атомов. Многократное рассеяние приводит к уширению углового распределения как по азимутальному, так и по полярному углам и в толстых кристаллах вызывает размывание углового распределения. Когерентное рассеяние наи-

более сильно при углах порядка критического угла каналирования и быстро уменьшается с ростом угла разориентации.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Walker R.L., Berman B.L., Der R.C. et al. — Phus. Rev. Lett., 1970, vol. 25, №1, p. 5.
2. Kumm H., Bell F., Sizmann P. et al.— Rad. Eff., 1972, vol. 12, №1—2, p. 53.
3. Мороховский В.П., Коваленко Г.Д., Гришаев И.А. и др.— Письма в ЖЭТФ, 1972, т. 16, №3, с. 162.
4. Гришаев И.А., Мороховский В.П., Шраменко Б.И.— ВАНТ. Сер. Физика высоких энергий, 1973, вып. 5(7), с. 56.
5. Гришаев И.А., Мороховский В.П., Шраменко Б.И.— В кн.: Тр. V Всесоюз. совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами.— Изд-во МГУ, 1974, с. 282.
6. Andersen S.K., Fich O., Nielsen H. et al.— Nucl. Phys. B, 1980, vol. 167, №1—2, p. 1.
7. Kudrin V.V., Vorobiev S.A.— Rad. Eff., 1974, vol. 21, №3, p. 145.

Редактор С.А. Руцкая  
Технический редактор С.А. Сведлюва  
Корректор Г.А. Матвеева

Подписано в печать 12.09.89. Т-12716. Формат 60X90/16  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,25. Уч.-изд. л. 0,5  
Тираж 150. Цена 10 коп. Заказ 327. Индекс 3624

Подготовлено к изданию и отпечатано  
в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова  
123182, Москва, пл. Академика Курчатова

10 коп.

Индекс 3624

Препринт ИАЭ-4944/1. М., 1989