

01;02

## **Механизм уменьшения плоскостного деканализирования релятивистских протонов**

© В.П. Кошчев, Д.А. Моргун, Н.В. Сафин, А.К. Холодов

Сургутский государственный университет  
E-mail: koshcheev1@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 декабря 2005 г.

С помощью метода компьютерного моделирования обнаружено значительное уменьшение числа деканализированных релятивистских протонов в плоскостном (100) канале кристалла германия. Показано, что механизм уменьшения плоскостного деканализирования связан с влиянием непрерывного потенциала плоскостного канала кристалла на эволюцию среднего квадрата флуктуаций поперечной динамической переменной (координаты, скорости или энергии) релятивистских протонов.

PACS: 41.75.Ht

Четверть века тому назад была опубликована работа [1], в которой, в частности, сообщалось о значительном уменьшении числа деканализированных протонов из осевых и плоскостных каналов кристаллов кремния и германия в диапазоне энергий от 2 до 15 GeV. Эти результаты нашли свое подтверждение в работе [2], где эффект осевого каналирования релятивистских протонов был исследован в диапазоне энергий от 35 до 250 GeV. В [2] было показано, что диффузионная модель [3] не описывает результаты эксперимента. К настоящему времени все еще нет теоретических объяснений этих результатов. Актуальность данной

задачи связана с тем, что интерес к эффекту каналирования релятивистских частиц не ослабевает [4].

Движение быстрых заряженных частиц в плоскостных каналах кристалла будем описывать в рамках ланжевеновского подхода к теории каналирования [5–6]. Система уравнений, описывающих эволюцию средних квадратов флуктуаций поперечной координаты и скорости, имеет вид [5]

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \overline{\delta x^2} &= 2 \overline{\delta x \delta \dot{x}}, \\ m \frac{d}{dt} \overline{\delta x \delta \dot{x}} &= m \overline{\delta \dot{x}^2} - U_{xx} \overline{\delta x^2}, \\ m \frac{d}{dt} \overline{\delta \dot{x}^2} &= -2U_{xx} \overline{\delta x \delta \dot{x}} + D, \end{aligned} \quad (1)$$

а уравнение, описывающее эволюцию среднего квадрата флуктуации поперечной энергии, имеет вид [6]

$$\frac{d}{dt} \overline{\delta E_{\perp}^2} = m \dot{x}^2 D, \quad (2)$$

где  $U_{xx} = \partial^2 U(x)/\partial x^2$ ;  $U = U(x)$  и  $D = D(x)$  — непрерывный потенциал и коэффициент диффузии, зависят от поперечной координаты, которая является решением уравнения движения:

$$m \ddot{x} = -U_x, \quad (3)$$

где  $m$  — релятивистская масса;  $\dot{x} = dx/dt$ .

Начальные условия к уравнению (3) переопределяются случайным образом (разыгрываются) с помощью решений уравнений (1) или (2) после прохождения каналированной частицей отрезка траектории, длина которого ограничена неравенствами

$$\begin{aligned} \overline{\delta x^2}(t) &\leq d^2 \cdot 25 \cdot 10^{-4}, \\ \overline{\delta \dot{x}^2}(t) &\leq v^2 \cdot \Psi_1^2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad (4)$$

или

$$\overline{\delta E_{\perp}^2}(t) \leq V_{\max}^2 \cdot 25 \cdot 10^{-4}, \quad (5)$$

где  $d$  — постоянная кристаллической решетки;  $v$  — скорость каналированной частицы;  $\Psi_1 = (2V_{\max}/mv^2)^{1/2}$  — критический угол каналирования Линдхарда [7];  $V_{\max}$  — максимальное значение потенциала плоскостного канала.

Розыгрыш запрещается, если после предыдущего розыгрыша пройдено расстояние, меньшее  $T_{\min}$ . Расстояние  $T_{\min} \geq 200 \text{ \AA}$  определяется минимальным количеством столкновений частицы с атомами кристалла, после которого возможно рассеяние. Решение системы уравнений (1) и (3) с учетом неравенств (4) составляет содержание компьютерной программы PST (the Phase Space of Transversal coordinates and velocities), а решение системы уравнений (2) и (3) с учетом неравенства (5) составляет содержание компьютерной программы STE (the Space of Transversal Energy). Новое значение поперечной скорости  $\dot{x}_{i+1}$  после прохождения канализованной частицей отрезка траектории, длина которого ограничена неравенством (5), найдем с помощью формулы

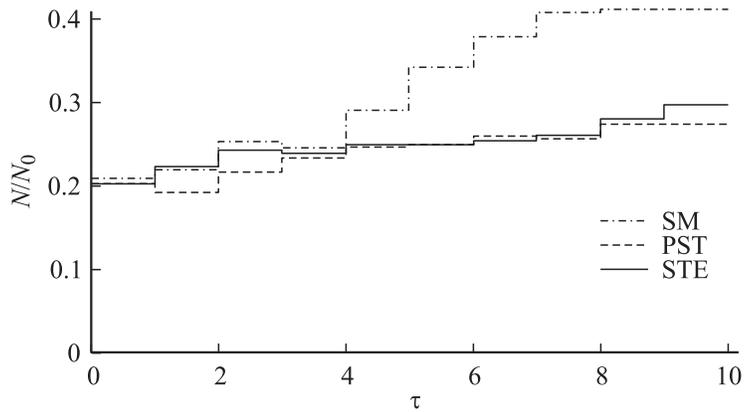
$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i \pm \Delta\dot{x}, \quad (6)$$

где

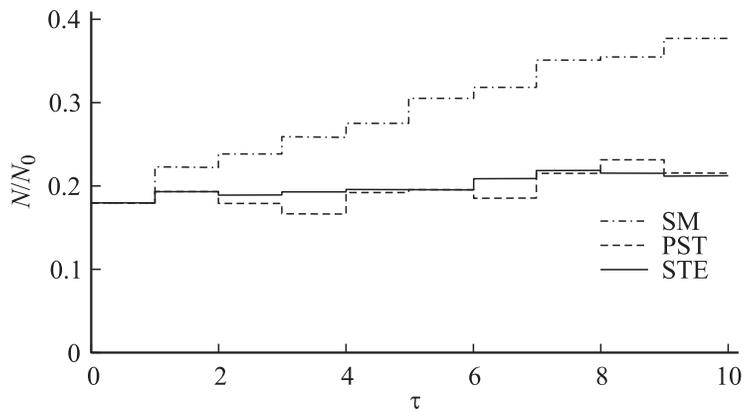
$$\Delta\dot{x} = \left| \sqrt{\frac{2|E_{\perp}^{i+1} - U(x_{i+1})|}{m}} - |\dot{x}_i| \right|$$

— приращение поперечной скорости; знак  $\pm$  определяется случайным образом;  $x_{i+1} = x_i$ ; новое значение поперечной энергии  $E_{\perp}^{i+1}$  определяем с помощью функции распределения Гаусса.

Ядерный коэффициент диффузии вычислялся в приближении Китагавы–Оцуки [8], а электронный коэффициент диффузии вычислялся в приближении локальной электронной плотности [7]. Непрерывный потенциал и коэффициент диффузии были разложены в тригонометрический ряд Фурье с учетом структурного фактора и фактора Дебая–Валлера. Температура кристалла  $T = 300 \text{ К}$ . Фурье-компонента потенциала атома и электронной плотности брались в приближении Мольер. Потери энергии канализованных частиц вычислялись вдоль каждой траектории с помощью формулы Бете–Блоха с учетом правила равномерного распределения Линдхарда [7], эффекта плотности и других релятивистских поправок в кулоновском логарифме. В рамках компьютерной программы PST реализована версия, названная нами SM (the Standard Model). Единственное отличие этой версии от программы PST состоит в том, что в системе уравнений (1) положено  $U_{xx} = 0$ . Многократное рассеяние в компьютерной программе SM учитывается в рамках стандартной модели, согласно которой скорость приращения среднего квадрата угла многократного рассеяния на единице длины пути пропорциональна плотности распределения атомных электронов и ядер в той точке пространства, где находится канализованная частица [7]. Гистограмма



**Рис. 1.** Графики относительного выхода релятивистских протонов с энергией 15 GeV, деканализированных из (100) плоскостного канала кристалла германия, в зависимости от безразмерной глубины проникновения  $\tau$ , рассчитанные с помощью компьютерных программ PST, STE и SM.



**Рис. 2.** То же, что и на рис. 1, но для релятивистских протонов с энергией 250 GeV.

распределения частиц по потерям энергии строится следующим способом: вся глубина кристалла разбивается на подслои одинаковой длины, для каждой частицы рассчитывается разница значений энергии в начале и конце каждого подслоя, делится на длину подслоя. В используемой

нами модели отбор деканализованных частиц производится по потерям энергии. Деканализованными считаются частицы, имеющие потери большие, чем каналированные частицы. Пороговое значение принимается равным 0.95 потерям энергии протонов в разориентированном кристалле германия. Относительный выход  $N/N_0$  строится как отношение числа деканализованных частиц  $N$  к полному числу частиц  $N_0$  в зависимости от глубины проникновения с заданным разрешением по глубине, которое не может быть меньше толщины подслоя. Глубина проникновения релятивистских протонов в кристалл германия выражалась в безразмерных единицах  $\tau = vt\Psi_1/d\sqrt{2}$ . Одна безразмерная единица  $\tau = 1$  соответствует четверти длины волны плоскостных колебаний каналированных протонов. Следующие результаты получены для пучка из  $N_0 = 301$  протона с энергией 15 и 250 GeV в (100) плоскостном канале кристалла германия. Начальные значения точки влета были равномерно распределены в пределах плоскостного канала, а угол влета был равен нулю. Расходимость пучка не учитывалась. Условия розыгрыша траекторий для программ PST, STE и SM были одинаковыми. Безразмерное расстояние  $\tau_{\min} = T_{\min}\Psi_1/d\sqrt{2} \leq 0.0013$ , что много меньше длины волны плоскостных колебаний каналированных протонов. На рис. 1 представлены графики относительного выхода протонов с энергией 15 GeV, а на рис. 2 представлены графики относительного выхода протонов с энергией 250 GeV. Видно, что относительные выходы, полученные по программам PST и STE совпадают между собой как при энергии 15 GeV, так и при энергии 250 GeV. Деканализация релятивистских протонов оказывается незначительным, в то время как расчет по программе SM демонстрирует значительный рост числа деканализованных протонов, что не наблюдалось в экспериментах [1–2]. Аналогичные результаты нами были получены как для релятивистских протонов с энергией 450 GeV в (111) плоскостном канале кристалла кремния, так и для релятивистских ионов гелия с энергией 14 GeV в (110) плоскостном канале кристалла кремния. Для ионов гелия с энергией 14 MeV в (110) плоскостном канале кремния результаты расчета деканализации по моделям PST, STE и SM совпадают между собой, что говорит о согласованности всех трех подходов в нерелятивистской области энергий. Таким образом, нами показано, что механизм уменьшения плоскостного деканализации связан с влиянием непрерывного потенциала плоскостного канала кристалла на эволюцию среднего квадрата флуктуаций поперечной динамической переменной (координаты, скорости или энергии) релятивистских протонов.

## Список литературы

- [1] *Andersen S.K., Fich O., Nielson H. et al. // Nucl. Phys. 1980. V. B167. P. 1–40.*
- [2] *Sun C.R., Gibson W.M., Kim I.J. et al. // Nucl. Phys. 1982. V. B203. P. 40–57.*
- [3] *Bonderup E., Esbensen H., Andersen J.U., Schiott H.E. // Rad. Eff. 1972. V. 12. P. 261–266.*
- [4] *Uggerhoj U.I., Hansen H.D., Jessen K. et al. // Physics Letters B. 2005. V. 619. Issues 3–4. P. 240–246.*
- [5] *Кощев В.П. // Изв. вузов. Физика. 1995. № 1. С. 100–104.*
- [6] *Кощев В.П., Моргун Д.А. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 1998. № 5. С. 5–11.*
- [7] *Линдхард Й. // УФН. 1969. Т. 99. В. 2. С. 249–296.*
- [8] *Kitagava M., Ohtsuki Y.H. // Phys. Rev. B. 1973. V. 8. N 7. P. 3117–3123.*