

# Расчет эффективности поворота пучков заряженных частиц изогнутыми плоскостями монокристаллов

В.А. Старостин

*РНЦ Курчатовский институт, Москва, Россия*

В работе [1] получено кинетическое уравнение, описывающее прохождение заряженных частиц через упруго деформированные кристаллы и произведен расчет для условий эксперимента [2]. В работе [3] измерены длины деканалирования 70 ГэВ протонов в изогнутых кристаллах кремния ориентации (110) и (111) длиной 60 мм. В работах [4, 5] измерены длины деканалирования 70 ГэВ протонов в изогнутых кристаллах кремния ориентации (110) и (111) длиной 5 и 7 мм соответственно. Но наиболее подробен эксперимент [6], в котором измерены длины деканалирования 60; 80; 100; 120; 150 и 200 ГэВ протонов в плоскости (110) 43-мм изогнутого монокристалла кремния при 20 и  $-145^{\circ}\text{C}$ . Интересен и эксперимент [7] по определению эффективности поворота 14; 120 и 270 ГэВ протонов плоскостью (110) 40 мм кристалла кремния. Оказалось, что экспериментальные данные [2–5] хорошо согласуются со следующей формулой для длины деканалирования и соответствующей эффективности поворота пучка:

$$L_d = L_0 / (1 + 0.8 * L_0 / L), \quad (1a)$$

$$\varepsilon = \exp(-L / L_d), \quad (1b)$$

где  $L$  – длина кристалла, полученной в диффузионном приближении, хорошо известном для прямого  $L_0$  кристалла [8]:

$$L_0 = 2.0337 / D_0, \quad (2)$$

где для электронов  $D_0 = E_s^2 / (8 * E_0 * U_m * L_r), \quad (3)$

а для протонов и позитронов

$$D_0 = 2 * e^2 * L_e / (E_0 * d_p^2), \quad (4)$$

$E_s = 21.2$  МэВ,  $U_m$  – глубина потенциальной ямы,  $L_r$  – радиационная длина,  $E_0$  – кинетическая энергия частицы,  $e^2 = 14.395$  эВ\*А,  $m_e c^2 = 511$  кэВ,  $d_p$  – межплоскостное расстояние и  $L_e$  – кулоновский логарифм:

для протонов  $L_e = 2 * (\ln(2 * m_e c^2 * \gamma^2 * \beta^2 / I) - \beta^2 - C_1 / Z - \delta(\gamma)),$

$\beta = v/c$ ,  $\ln(I) + C_1 / Z = 5.2$  для кремния и для наших значений лоренц-фактора  $\gamma$ :

для протонов  $L_e = 2 * (\ln(2 * m_e c^2 * \gamma^2 * \beta^2 / I) - \beta^2 - C_1 / Z - \delta(\gamma))$ ,  $\beta = v/c$ ,  $\ln(I) + C_1 / Z = 5.2$  для кремния и для наших значений Лоренц-фактора  $\gamma$ :

$$\delta(\gamma) = 4.606 * \log(\gamma) - 4.428 + 0.15973 * (3 - \log(\gamma))^3;$$

для позитронов  $L_e = \ln(2 * \gamma * E_0^2 / I^2) - 23/12 - \delta_1$ ,  $I$  – потенциал ионизации,  $\delta_1$  – поправка на эффект плотности для позитронов.

Заметим, что для (111)  $L_0$  есть сумма  $L_0^{(L)}$  и  $L_0^{(S)}$ .

Относительно формулы (1) важно отметить:

- 1) Коэффициент 0.8 соответствует монокристаллам со знаком магнитного момента, как у кремния. Для монокристаллов со знаком магнитного момента, как у германия, необходимо использовать коэффициент 0.2.
- 2) Рассчитанное значение эффективности относится к области плоской вершины ее гауссовской зависимости от угла поворота (т. е. угол поворота настолько мал, что радиус изгиба кристалла много больше критического радиуса Цыганова).

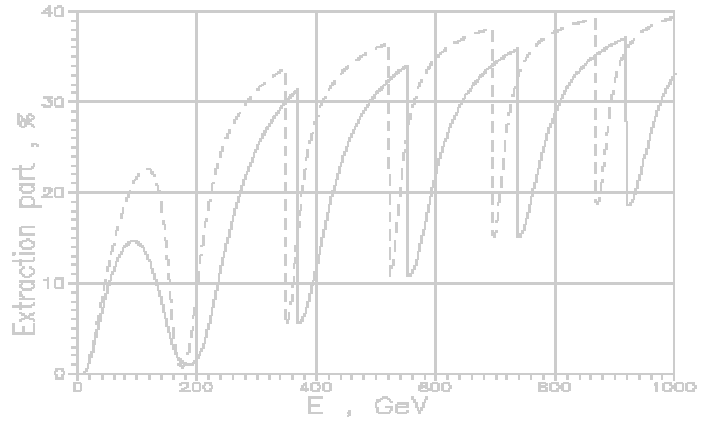
Экспериментальные данные [6, 7] сильно не согласуются с (1), (2). Чтобы согласовать теорию и эксперимент, необходимо ввести поправочный коэффициент:

$$\sigma_{\text{res}} / \sigma_0 = 2 + A / (1 + x^2) + B * x / (1 + x^2) + \Sigma, \quad (5)$$

где  $x = 2 * (E_0 - E_{\text{res}}) / \Gamma$ ,  $\Sigma$  – вклад высших гармоник,  $B / A = \text{tg}(2 * \alpha)$  и  $\alpha = 130$  мрад (для условий [6]).

По методу наименьших квадратов определены параметры  $A = 15.72$ ,  $E_{\text{res}} = 183.76$  ГэВ и  $\Gamma = 69.51$  ГэВ для температуры  $20^\circ\text{C}$  по данным [6, 7] и для температуры  $-145^\circ\text{C}$  по данным [6]. Величина  $A$  не зависит от температуры. Величина  $\Gamma$  прямо пропорциональна температуре в  $^\circ\text{K}$ , что объясняется ее ударным уширением. Положение максимума смещается в сторону меньших энергий ( $E_{\text{res}} = 173.79$  ГэВ) при охлаждении кристалла, несмотря на то, что глубина потенциальной ямы увеличивается.

Введение поправочного коэффициента (5) оправдано, если существует резонансное рассеяние в поперечной плоскости при энергии 42.8 эВ. Заметим, что аналогичная картина имеет место для длин деканализации электронов и позитронов в плоскости (110) кристалла кремния, где по данным [9] для 350 МэВ имеется согласие с (2), а данные [10, 11] для 1200 МэВ сильно расходятся с простой теорией, но полностью согласуются с (5) как для электронов, так и для позитронов. Отметим, что энергии резонансов для электронов и позитронов смещены относительно друг друга примерно на 107.36 МэВ ( $\alpha = 15^\circ$ ).



На рисунке приведена зависимость доли отклоненных протонов от энергии для условий [6] ( $L = 43$  мм,  $T = 20$  и  $-145^\circ\text{C}$ ). Аналогичная картина имеет место и для плоскостей (111) и (100) при энергиях резонансов в поперечной плоскости равной  $2 \cdot U_m$ .

## Список литературы

- [ 1 ] Белошицкий В.В., Старостин В.А. – Письма в ЖТФ, т.14, в.8, с.722-726 (1988).
- [ 2 ] Elishev A.F. et al. – Phys.Lett. B, v.88, №3-4, pp.387-391 (1979).
- [ 3 ] Birjukov V.M. et al. – NIM PR B, v.86, p.245-250 (1994).
- [ 4 ] Афонин А.Г. и др. – Письма в ЖЭТФ, т.68, в. 7, с. 544-548 (1998).
- [ 5 ] Афонин А.Г. и др. – Письма в ЖЭТФ, т.67, в. 10, с.741-745 (1998).
- [ 6 ] Forster J.S. et al. – Nucl.Phys. B, v.318, No2, pp.301-318 (1989).
- [ 7 ] Arduini G. et al. – Preprint CERN SL/97-55 (AP),  
“ On the energy dependence of proton beam extraction with a bent crystal “, 14 p.
- [ 8 ] Кумахов М.А., Старостин В.А. – ЖТФ, т.57, в. 3, с. 612-613 (1987).
- [ 9 ] Komaki K. et al. – NIM PR B, v.2, p.71-73 (1984).
- [ 10 ] Адейшвили Д.И. и др. – Письма в ЖТФ, т.10, в. 4, с. 197-200 (1984).
- [ 11 ] Витько В.И., Коваленко Г.Д. – ЖЭТФ, т.94, в.10, с. 321-327 (1988).