

- [4] Аникин В.И., Зайцев С.В., Корольков В.И., Шевцов В.М. В кн.: Интегральная оптика. Физические основы. Приложения. Новосибирск: Наука, 1986, с. 52-58.
- [5] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
- [6] Комник Ю.Ф. Физика металлических пленок. М.: Атомиздат, 1979. 263 с.
- [7] Дерюгин Л.Н., Сотин В.Е., Шевцов В.М. // Письма в ЖТФ. Т. 12. В. 2. С. 81-85.

Университет
Дружбы народов
им. Патриса Лумумбы

Поступило в Редакцию
8 июня 1988 г.
В окончательной редакции
2 декабря 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 3 12 февраля 1989 г.
05.2; 10

ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ ПЛОСКОСТНОМ КАНАЛИРОВАНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ТОЛСТЫХ КРИСТАЛЛАХ

Т.А. Боброва, Л.И. Огнев

Исследование излучения при каналировании в кристаллах релятивистских электронов с энергией несколько МэВ до настоящего времени проводилось лишь в случае малых толщин кристаллов ($\lesssim 20$ мкм). Обзор экспериментальных и теоретических работ можно найти в [1, 2]. Излучение же в толстых кристаллах, толщина L которых значительно превышает длину деканалирования электронов L_g (~ 5 мкм), практически не исследовалось, что связано как с трудностью теоретического описания кинетики каналированных частиц, так и с проблемой исключения влияния фона при выполнении измерений. Значительное упрощение теоретической части исследования излучения при каналировании электронов в толстых кристаллах может быть достигнуто использованием асимптотической зависимости квазиравновесной населенности связанных уровней поперечного движения электронов на расстояниях $z \gg L_g$ при учете поглощения излучения на выходе из кристалла [3].

Поток излучения, и испущенного электронами при плоскостном каналировании в кристалле толщиной L , частично поглощается, и на выходе из кристалла представим его в виде

$$N = \int_0^L W \cdot C(z) \exp(-\mu(L-z)) dz, \quad (1)$$

где $C(z)$ - населенность связанного состояния электрона, W - вероятность излучения фотона, μ - линейный коэффициент поглощения излучения.

На расстояниях в кристалле $z \lesssim L$ населенность энергетических уровней поперечного движения электрона в канале может быть определена через решение уравнения для волновой функции электрона $\langle \psi(x, z) \rangle$, усредненной по тепловым колебаниям атомов кристалла [4]. В качестве оценки $C(z)$ на таких расстояниях можно использовать экспоненциальную зависимость:

$$C(z) \sim \exp\left(-\frac{z}{L_g}\right), \quad z \leq L_g. \quad (2)$$

Когда глубина проникновения электронов в кристалл значительно превышает длину деканалирования $z \gg L_g$, населенность каждого из n подбарьерных уровней электрона можно оценить через угловое распределение электронов $f(\theta, z)$:

$$C(z) = \frac{1}{n} \int_{-\alpha_A}^{\alpha_A} f(\theta, z) dz. \quad (3)$$

Здесь θ - угол отклонения электрона от направления каналирования, α_A - критический угол каналирования. Распределение $f(\theta, z)$ связано преобразованием Фурье с поперечной корреляционной функцией электронов $\Gamma(x_1, x_2, z) = \langle \psi(x_1, z) \psi^*(x_2, z) \rangle$, определяемой из уравнения, полученного в приближении малоуглового рассеяния [3]:

$$2ik_z \frac{\partial}{\partial z} \Gamma + \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + k_z^2 \langle U(x_1, z) \rangle - k_z^2 \langle U(x_2, z) \rangle \right) \Gamma + \frac{ik_z^3}{2} (A(0) - A(x_1 - x_2)) \Gamma = 0. \quad (4)$$

Здесь k_z - проекция волнового вектора электрона на направление

каналирования, $U(x, z) = \frac{2m\alpha^4}{k_z^2 \hbar} V(x, z)$, $V(x, z)$ - кристаллический

потенциал, $A(x_1 - x_2)$ - поперечная корреляционная функция для флуктуирующей части кристаллического потенциала, соответствующей тепловым колебаниям атомов.

При $z \gg L_g$ асимптотическое приближение для углового распределения близко к гауссову [5]:

$$f(\theta, z) \approx (2\pi \langle \theta^2 \rangle)^{-1/2} \exp(-\theta^2 / 2 \langle \theta^2 \rangle),$$

следовательно,

$$C(z) \approx \frac{2\alpha_1}{n} (2\pi \langle \theta^2 \rangle)^{-1/2}; \quad z \gg L_g. \quad (5)$$

На больших глубинах значительная часть электронов деканалитруется, и расплывание пучка определяется диффузией в области углов $\theta > \alpha_1$,

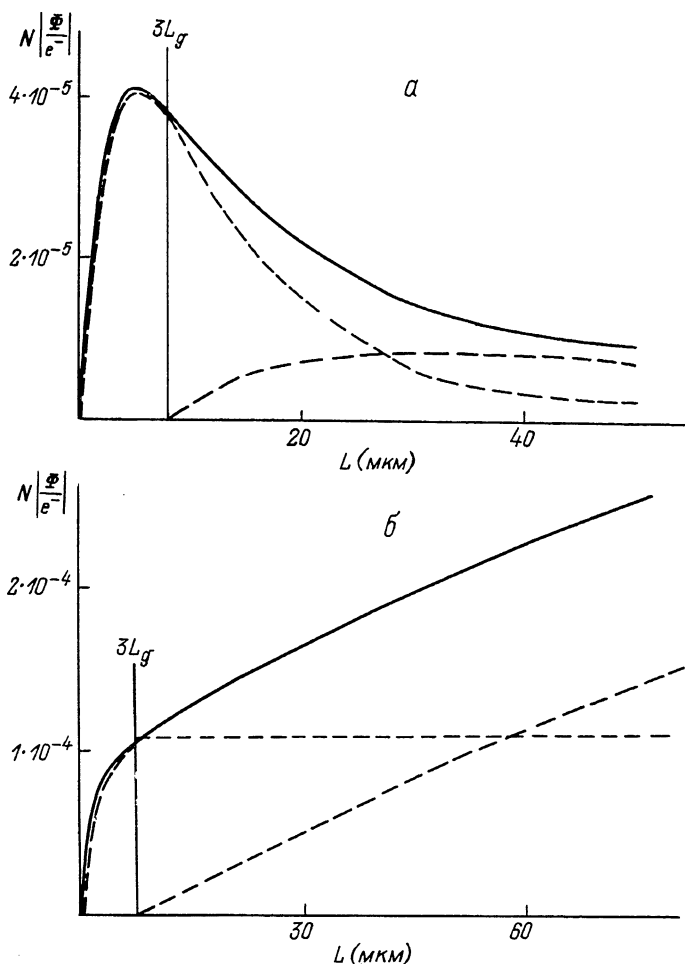


Рис. 1. Зависимость потока фотонов от толщины кристалла: а) кремний, плоскость (110), $E=4$ МэВ, переход $1 \rightarrow 0$, энергия фотона 1.7 КэВ; б) алмаз, плоскость (110), $E=54$ МэВ, переход $1 \rightarrow 0$, энергия фотона 162 КэВ.

поэтому величина $\langle \theta^2 \rangle$ может быть определена в приближении аморфного вещества: $\langle \theta^2 \rangle \sim \frac{1}{2} \left(\frac{E_s}{E} \right)^2 \frac{z}{R}$, где E - энергия электрона, $E_s = 21$ МэВ, R - радиационная длина.

С целью качественного анализа излучения каналированных электронов в кристаллах различной толщины используем приближенные выражения для населенности (2), (5), сшивая значения $C(z)$ при

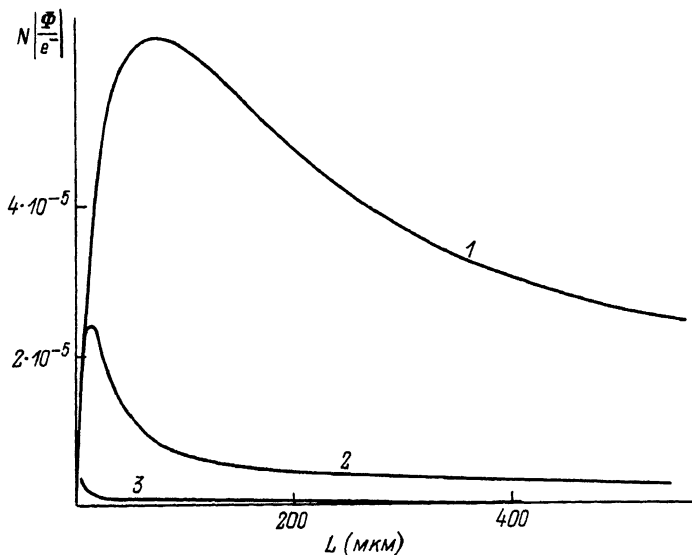


Рис. 2. Зависимость потока фотонов энергией 2 КэВ от толщины кристалла: 1 - бериллий, плоскость (0001), $E=4.8$ МэВ, переход $1 \rightarrow 0$; 2 - алмаз, плоскость (111), $E=4.4$ МэВ, переход $2 \rightarrow 1$; 3 - кремний, плоскость (110), $E=4.2$ МэВ, переход $1 \rightarrow 0$.

$z \ll L_g$ и при $z \gg L_g$ на глубине кристалла, например $z = 3L_g$.

Рассмотрим два примера. а) Каналирование электронов энергией 4 МэВ в кристалле кремния. На основе экспериментальных данных работы [6] была оценена длина деканалирования $L_g = 2.7$ мкм. б) Каналирование электронов энергией 54 МэВ в кристалле алмаза. В соответствии с результатами эксперимента [7], оценка для длины деканалирования дает $L_g = 2.5$ мкм. Результаты расчета выхода фотонов из кристаллов кремния и алмаза показаны сплошными линиями на рис. 1, а, б. Отдельно пунктирными линиями представлены вклады в излучение электронов, движущихся в канале при $z < 3L_g$ и при $z > 3L_g$. Два приведенных примера отличаются коэффициентами поглощения излучения веществом: в первом случае большим, во втором - пренебрежимо малым. В случае сильного поглощения максимальный выход фотонов приходится на толщину кристалла $L_{max} < 3L_g$ и определяется излучением электронов, каналированных при $z < L_{max}$. В случае же малого поглощения максимум достигается на гораздо больших толщинах и определяется излучением электронов, каналированных при $z \gg L_g$. В обоих случаях на достаточно большой глубине вклад в излучение электронов, остающихся в канале при $z > 3L_g$, становится доминирующим, что обусловлено их слабым рассеянием.

Рассмотрим рис. 2, где представлены оценки выхода фотонов энергией 2 КэВ, излучаемых электронами при каналировании в кристаллах бериллия, алмаза, кремния. В данном случае приближение аморфного вещества для оценки населенности использовалось на всей толщине кристалла. Такое допущение приводит к изменению оценок выхода излучения не более, чем в 1.5 раза, не меняя качественных выводов: в легких кристаллах (Be) максимум излучения при каналировании достигается на больших толщинах по сравнению с кристаллами более тяжелыми (C, Si), а величина максимума возрастает.

Таким образом, толщина кристалла, оптимальная с точки зрения наибольшего выхода излучения при каналировании, может значительно превышать длину деканалирования и будет тем больше, чем меньше поглощение излучения веществом. В этом случае основной вклад в излучение вносят электроны, остающиеся в канале на расстояниях, значительно больших длины деканалирования.

Л и т е р а т у р а

- [1] Coherent Radiation Sources / Eds. A.W. Saenz, H. Uberall. Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer-Verlag, 1985. 235 p.
- [2] К у м а х о в М.А. Излучение каналированных частиц в кристаллах. М.: Энергоатомиздат, 1986. 160 с.
- [3] Б о б р о в а Т.А., О г н е в Л.И. Тезисы докл. Ш все-союз. конф. по излучению релятивистских частиц в кристаллах, 25-30 мая 1988 г., Нальчик, 1988, с. 100-101.
- [4] Д а б а г о в С.Б., О г н е в Л.И. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 9. С. 1695-1701.
- [5] A n d e r s e n J.U., B o n d e r u p E., L a g s g a a r d E., S o r e n s e n A.H. // Physica Scripta. 1983. V. 28. N 3. P. 308-330.
- [6] A n d e r s e n J.U., E r i k s e n K.R., L a g s g a a r d E. // Physica Scripta. 1981. V. 24. N 3. P. 588-600.
- [7] G o u a n e r e M., C u e N., B e r m a n B.L. et al. // Nuclear Instr. Meth. 1982. V. 194. N 13. P. 225-228.

Институт атомной
энергии им. И.В. Курчатова

Поступило в Редакцию
28 ноября 1988 г.