

## НЕКОГЕРЕНТНОЕ РАССЕЯНИЕ КАНАЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

*Е. А. Ковалева, В. С. Малышевский*

Анализируется некогерентное взаимодействие релятивистских каналированных электронов с элементарными возбуждениями кристаллической решетки. Выявлены новые особенности ширины уровней поперечного движения при осевом каналировании. Рассчитаны спектральные плотности излучения электронов с энергией 4 и 21 МэВ, каналирующих в кристалле кремния вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ . Проведено сравнение с экспериментальными данными.

Стабильность траекторий каналированных электронов и особенности спектров спонтанного излучения определяются взаимодействием электронов с электрон-фононной системой кристалла. Целью настоящей работы является квантовый анализ влияния некогерентного взаимодействия каналированных электронов с возбуждениями кристаллической решетки на характеристики осевого каналирования электронов и их излучение.

Вероятность перехода системы из состояния  $|\lambda\xi\rangle$  в состояние  $|\lambda'\xi'\rangle$  определяется амплитудой перехода

$$P_{\lambda\xi, \lambda'\xi'} = \lim_{z \rightarrow \infty} |a_{\lambda\xi, \lambda'\xi'}(z)|^2,$$

где

$$a_{\lambda\xi, \lambda'\xi'}(z) = -i \int_{-\infty}^z dz \langle \lambda'\xi' | H_i | \lambda\xi \rangle \exp \{-i(\epsilon_\lambda + \Omega_\xi - \epsilon_{\lambda'} - \Omega_{\xi'})z\}.$$

Вероятность распада состояния  $|\lambda\rangle$  получим после суммирования по всем  $|\xi\rangle$ ,  $|\lambda'\rangle$  и статистического усреднения по начальным состояниям  $|\xi\rangle$  ( $|\lambda\rangle$  и  $\epsilon_\lambda$  — поперечные компоненты волновой функции и поперечные энергии каналированного электрона;  $|\xi\rangle$ ,  $\Omega_\xi$  — волновые функции и энергии состояний кристалла;  $H_i$  — гамильтониан взаимодействия, из которого вычтена нулевая гармоника, не зависящая от  $z$  и не приводящая к квантовым переходам).

Как обычно, предположим, что в процессе взаимодействия с быстрой каналирующей частицей состояние кристалла мало отличается от равновесного. Тогда имеем

$$P_\lambda(z) = \int_{-\infty}^z dz' \int_{-\infty}^z dz'' \langle \lambda\xi | H_i(z') G_\lambda(z' - z'') H_i(z'') | \lambda\xi \rangle, \quad (1)$$

$$G_\lambda(z) = \sum_{\lambda'} \exp \{i(\epsilon_\lambda - \epsilon_{\lambda'})z\} |\lambda'\rangle \langle \lambda'|.$$

В данной работе мы ограничимся рассмотрением взаимодействия только с фононными возбуждениями, которые являются определяющими в рассеянии каналированных электронов [1-5]. В однофононном приближении из (1) получим удобную формулу для вероятности распада, отнесенной к единице длины

$$\gamma_\lambda \approx \frac{1}{2\pi} \frac{T_\kappa}{Mnc_p^2} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{T}{T_\kappa} K_\lambda \right\} \langle \lambda | \nabla_{\perp} v \rangle^2 | \lambda \rangle, \quad (2)$$

где  $T_\lambda$  — дебаевская температура,  $c_{ph}$  — скорость звука,  $M$  — масса атома,  $n$  — концентрация атомов,

$$K_\lambda \approx \frac{1}{2} \left\{ \ln \frac{T}{\Delta\varepsilon_{\max} c_{ph}} + \ln \frac{T}{\Delta\varepsilon_{\min} c_{ph}} \right\},$$

$$\Delta\varepsilon_{\max} \approx |\varepsilon_\lambda|, \quad \Delta\varepsilon_{\min} \approx \min |\varepsilon_\lambda - \varepsilon_{\lambda'}|.$$

Формула (2) использовалась для оценок теплового уширения уровней поперечного движения при каналировании электронов с энергией 4 и 21 МэВ вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  в кристалле кремния. Для этого предварительно численно решалась

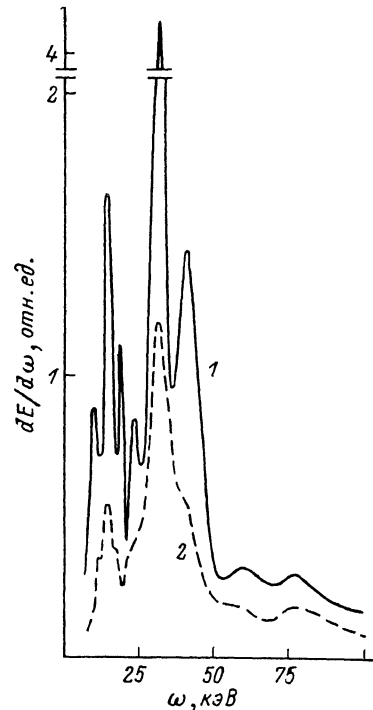
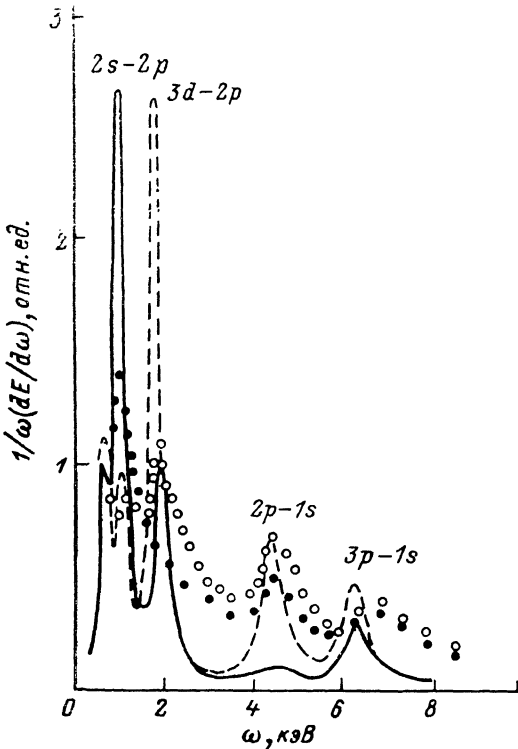


Рис. 1. Выход электромагнитного излучения электронов с энергией 4 МэВ, каналирующих в кристалле кремния вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  при углах влета пучка  $\theta_i = 0^\circ$  (1) и  $0.06^\circ$  (2).

Коллимация излучения  $1.26 \cdot 10^{-5}$  ср, угловая расходимость пучка  $0.02^\circ$ . Нормировка рассчитанных кривых и экспериментальных точек [3] проводилась по максимуму -перехода  $2p-1s$  при ориентации  $0.06^\circ$ .

Рис. 2. Выход электромагнитного излучения электронов с энергией 21 МэВ, каналирующих в кристалле кремния вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ .

Угол влета  $0.2\theta_i$ , коллимация излучения  $1/5\gamma$  ( $\gamma$  — лоренц-фактор). 1 —  $T=100$ , 2 — 300 К. При расчете спектральной плотности учитывалось 46 радиационных переходов.

задача на собственные значения  $\varepsilon_\lambda$  и собственные функции  $|\lambda\rangle$  в приближении изолированной цепочки. В качестве потенциала атомной цепочки  $\bar{V}$  использовалась аппроксимация Линдхарда с учетом усреднения по тепловым колебаниям (см., например, [3]). Найденные значения энергий  $\varepsilon_\lambda$  и функции  $|\lambda\rangle$  использовались в (2) для расчетов ширины  $\gamma_\lambda$ . Некоторые результаты расчетов при  $T=300$  К представлены в табл. 1, 2.

Обращает на себя внимание рост ширины уровней с увеличением энергии электронов. Это связано с тем, что с увеличением энергии электронов волновые функции состояний поперечного движения локализуются ближе к атомной цепочке, т. е. в области, где градиент потенциала  $\bar{V}$  больше. На электрон при этом действует большая сила и он, следовательно, сильнее рассеивается. Дальнейшее увеличение энергии, как показывает анализ общей формулы (1), приведет к уменьшению  $\gamma_\lambda$  с ростом энергии.

Сравнение рассчитанной ширины некоторых состояний при каналировании электронов с энергией 4 МэВ в кремнии вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  с результатами [7, 8]

Состояние	$\gamma_{\lambda}$ , эВ			
1s	2.83	2.82 [8]	3.73 [7]	4.30 [8]
2p	0.70	0.81 [8]	1.33 [7]	0.62 [8]

Примечание. В последнем столбце — результаты борновского приближения.

Таблица 2

Значения энергетического интервала и ширины для некоторых переходов при каналировании электронов в кремнии вдоль оси  $\langle 111 \rangle$

Переход	E, МэВ	$\epsilon_{\lambda} - \epsilon_{\lambda'}$ , эВ	$\gamma_{\lambda} + \gamma_{\lambda'}$ , эВ
2p—1s	4	36.47	3.53
	21	23.29	4.92
2s—2p	4	9.15	1.19
	21	14.60	3.16

Полученные результаты для ширины уровней использовались для расчета выхода излучения каналированных электронов. Вычисления выхода проводились по формулам работы [6], которые учитывают нерадиационный распад состояний поперечного движения, условия влета электронов в кристалл, коллекцию излучения. Рассчитанные спектральные плотности излучения электронов с энергией 4 МэВ приведены на рис. 1. Представленные результаты получены с учетом угловой расходимости пучка [3], а также с учетом дополнительного «пролетного» уширения уровней  $\sim 1/l$ ,  $l$  — толщина кристалла,  $l=0.5$  мкм [3]. Ширина полосы излучения на переходе 2p—1s, измеренная с разрешением 300 эВ в эксперименте [8], равна 950 эВ, а рассчитанная с использованием формулы (2)—800 эВ (рис. 1). Несоответствие теории и эксперимента по относительной интенсивности радиационных переходов из 3p и 3d состояний связано, по-видимому, с сильным зонным уширением этих состояний, которое изменяет вероятность их заселения и выход излучения в максимуме. На рис. 2 показаны спектральные плотности излучения при различных температурах кристалла. Увеличение температуры приводит к подавлению тонкой структуры спектральной плотности и к уменьшению полного выхода квантов.

## Литература

- [1] Кумахов М. А. Излучение каналированных частиц в кристаллах. М.: Энергоатомиздат, 1986. 160 с.
- [2] Ахмедов А. И., Шульга Н. Ф. УФН, 1982, т. 137, № 4, с. 561—604.
- [3] Andersen J. U. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1982, v. 194, № 1—3, p. 209—224.
- [4] Beloshitsky V. V., Komarov F. F. Phys. Rep., 1982, v. 93, № 3, p. 117—197.
- [5] Bazylev V. A., Goloviznin V. V. Rad. Eff., 1983, v. 69, № 3—4, p. 159—164.
- [6] Мальшевский В. С. Изв. СКНЦ ВШ. Естественные науки, 1985, т. 2, № 2, с. 40—46.
- [7] Мухеев С. А., Тулюнов А. В. ФТТ, 1986, т. 28, N 8, с. 2447—2454.
- [8] Andersen J. U. et al. Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res., 1984, v. B2, № 1, p. 63—66.

Ростовский-на-Дону государственный университет  
Научно-исследовательский институт физики

Поступило в Редакцию  
4 мая 1987 г.  
В окончательной редакции  
16 октября 1987 г.