

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ГОС. КОМИТЕТА ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

На правах рукописи

АВАКЯН АРУТЮН РОБЕРТОВИЧ

УДК 538.56:539.12

ДИНАМИКА И ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ИЗЛУЧЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В МОНОКРИСТАЛЛАХ  
ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ И КВАЗИКАНАЛИРОВАНИИ

01.04.02 - Теоретическая и  
математическая физика

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

ЕРЕВАН - 1986

Работа выполнена в Ереванском физическом институте.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
ЯН ШИ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
КОМАРОВ Ф.Ф.  
(БГУ)

доктор физико-математических наук  
КОРХМАЗЯН Н.А.  
(ЕрПИ им. Х.Абовяна)

Ведущая организация: Институт атомной энергии им. Курчатова

Защита состоится "30" сентября 1986г. в 14 часов  
Д.034.03.01 при Ереванском физическом институте (г.Ереван,  
36, ул. Маркаряна, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского физического института.

Автореферат разослан "29" августа 1986 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат физ.-мат. наук

КАХЧАДЯН В.А.

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание источников интенсивного гамма-излучения является одной из актуальных проблем в современной экспериментальной и прикладной физике. Принципиально новые возможности возникли в последнее время в связи с открытием интенсивного излучения при каналировании и квазиканалировании релятивистских электронов и позитронов в кристаллах, движущихся под малыми углами относительно кристаллографических осей и плоскостей.

Излучение при каналировании и квазиканалировании имеет значительно более высокую спектральную и спектральноугловую плотность по сравнению с плотностью обычного тормозного излучения в аморфном веществе, а также большую степень поляризации и монохроматичности. Такой интенсивный источник рентгеновских и гамма-квантов высоких энергий (с необходимой поляризацией) можно использовать, например, для исследования структуры атомных ядер, а также для диагностики структуры и динамических свойств кристаллических материалов. Это стимулировало дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования в этой области как в СССР, так и за рубежом.

Построение теории движения и излучения каналированных и квазиканалированных частиц в монокристаллах, согласующейся с

с экспериментом, необходимо для более глубокого понимания протекающих процессов, планирования дальнейших экспериментов и конструирования соответствующих устройств для практических применений.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование динамики и характеристик излучения заряженных частиц, движущихся под малыми углами относительно кристаллографических плоскостей и осей, а также сравнение теоретических результатов рассчитанных на основе реалистического потенциала кристалла, с имеющимися экспериментальными данными в этой области.

Научная новизна. В рамках классической электродинамики и модели Моллера для потенциала изолированного атома в приближении непрерывных плоскостей численно рассчитаны спектры излучения электронов и позитронов с энергиями 2+55 ГэВ при плоскостном каналировании в кристаллах типа алмаза. Показано, что многократное рассеяние заряженных частиц при каналировании в кристалле сильно отличается от рассеяния в эквивалентном аморфном веществе. Впервые рассмотрена возможность подавления некогерентного многократного рассеяния при плоскостном каналировании и квазиканалировании электронов. Показано, что этот эффект сохраняется до больших глубин проникновения частиц в кристалл, что приводит к изменению угловых распределений вылетающих электронов и спектральных характеристик излучения.

Впервые исследовано влияние некогерентного многократного рассеяния при плоскостном каналировании и квазиканалировании в направлении, перпендикулярном плоскости траектории частиц, на спектры излучения. Показано, что такое рассеяние может существенно изменить спектры излучения как электронов, так и

позитронов, даже при сравнительно малых толщинах кристаллов.

Разработан математически метод исследования движения заряженных частиц при малых углах влета в кристалл относительно кристаллографических осей.

Впервые дано количественное объяснение наличия минимума в кривой зависимости полных радиационных потерь энергии релятивистских электронов от угла влета в кристалл от относительно кристаллографических осей вблизи критического угла Линдхарда.

На основе численного моделирования траекторий частиц получены угловые распределения полных радиационных потерь при осевом каналировании и квазиканалировании. Показано, что коллимация испускаемого излучения может существенно изменить вид кривой зависимости полных потерь от угла влета частиц в кристалл.

Получено, что при осевом квазиканалировании угловые распределения вылетающих из кристалла электронов и позитронов при определенных толщинах могут иметь кольцеобразную форму.

Практическая ценность. Показана перспективность излучения при плоскостном каналировании и квазиканалировании для создания источника интенсивного и направленного гамма-излучения. Установлено, что электроны при плоскостном каналировании испытывают подавленное многократное рассеяние по сравнению с эквивалентным аморфным веществом, что приводит к существенно-му увеличению длины деканалирования.

Предложенный математический метод может быть использован при исследовании динамики и характеристик излучения заряженных частиц, влетающих в кристалл под малыми углами относительно кристаллографических осей и плоскостей.

На защиту выносятся:

1. Результаты расчета спектров излучения релятивистских электронов и позитронов с энергиями 2+55 ГэВ при плоскостном каналировании в кристаллах типа алмаза в приближении Мольера-Эплтона для межплоскостного потенциала.
2. Существование подавления многократного некогерентного рассеяния на тепловых колебаниях атомов при плоскостном каналировании и квазиканалировании электронов в кристаллах.
3. Результаты численного моделирования траекторий ультрарелятивистских электронов и позитронов при плоскостном каналировании и квазиканалировании с учетом их некогерентного рассеяния.
1. Результаты решения кинетического уравнения Фоккера-Планка для электронов при их плоскостном каналировании и квазаканалировании и проведенных на основе полученных функций распределения по поперечным энергиям расчетов спектров излучения частиц.
5. Результаты численного моделирования траекторий ультрарелятивистских электронов и позитронов при осевом каналировании и квазиканалировании в кристаллах.
6. Существование минимума в кривой зависимости полных радиационных потерь от угла влета электронов относительно кристаллографических осей вблизи критического угла каналирования.
7. Существование характерной кольцевой картины в распределении по поперечным скоростям вылетающих из кристалла частиц при осевом квазиканалировании.
3. Результаты численного расчета спектров излучения, полных потерь энергии и угловых распределений радиационных потерь

релятивистских электронов и позитронов при осевом каналировании и квазиканалировании.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на II Всесоюзной школе по взаимодействию ускоренных частиц с веществом (Ташкент, 1982), на II Всесоюзной конференции по электромагнитному излучению релятивистских частиц в кристаллах (Чегет, 1983), на XV Всесоюзном совещании по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами (Москва, 1985).

Результаты работы неоднократно докладывались на семинарах лаборатории "Взаимодействия заряженных частиц с веществом" ЕРФИ.

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит 134 страницы текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит две таблицы, 34 иллюстрации и 129 библиографических ссылок.

## II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен краткий обзор литературы, сформулированы основные задачи диссертационной работы, кратко описано распределение материала по главам диссертации и перечислены основные положения, которые автор выносит на защиту.

В первой главе рассмотрены спектры излучения ультрарелятивистских электронов и позитронов с энергиями 2+55 ГэВ в непрерывном потенциале кристаллографических плоскостей. Создана программа расчета спектров излучения для движения частиц в

поле произвольного потенциала, в частности, потенциала плоскостей (III) в кристаллах типа алмаза.

Проведены оценки применимости приближения непрерывного потенциала плоскости, когда импульс частиц составляет малый угол как с кристаллографическими плоскостями, так и с осями. Показано, что при углах влета  $\theta_0^{(P)}$  частиц в кристалл относительно кристаллографических плоскостей порядка критического угла Линдхарда  $\theta_L^{(P)}$ , поправка к непрерывному потенциалу плоскостей, связанная с дискретным характером плоскостей уже при углах  $\theta_0$  относительно кристаллографических осей порядка четырех критических углов Линдхарда  $\theta_L^{(S)}$ , составляет  $\frac{1}{2}$  и с увеличением угла  $\theta_0$  падает пропорционально  $(\theta_L^{(S)}/\theta_0)^2$ . Расчет непрерывных потенциалов плоскостей проводился на основе аппроксимации Мольера для изолированного атома с последующим усреднением по тепловым колебаниям атомов. Спектры излучения рассчитаны в рамках классической электродинамики при предположении о периодичности траекторий каналированных и квазиканалированных частиц. Исследована зависимость спектральных характеристик от поперечной энергии частиц. Получены спектры излучения электронов и позитронов при плоскостном каналировании и квазиканалировании путем численного интегрирования формулы для спектра частицы с данной поперечной энергией и последующего усреднения с учетом функции распределения частиц по поперечным энергиям. Проведено сравнение рассчитанных спектров с аналогичными теоретическими спектрами, полученными в более простых моделях непрерывного потенциала, а также с соответствующими экспериментальными данными. Такое сравнение позволило выяснить, насколько неточности определения потенциала

плоскостей (в частности, ангармонизм) обуславливают расхождения между экспериментом и теорией. Расчет показал, что параболический потенциал является достаточно хорошим приближением в случае позитронов (как каналированных, так и надбарьерных) за исключением лишь тех частиц, которые в режиме каналирования подходят к плоскости ближе, чем на расстояния порядка амплитуды тепловых колебаний. Сравнение расчетов с экспериментальными данными по плоскостному каналированию позитронов показало, что эффекты некогерентного рассеяния на ядрах и электронах среды могут существенно изменить спектры излучения даже на толщинах, малых по сравнению с длиной деканалирования.

В заключении первой главы в целях иллюстрации возможностей развитого метода расчета рассмотрены спектры излучения позитронов при каналировании в плоскостях (III) алмаза, которые характеризуются двумя значениями межплоскостного расстояния. Интересной особенностью излучения частиц при такой ориентации является двухпиковая структура спектра даже для первой гармоники.

Во второй главе проведен сравнительный анализ многократного рассеяния заряженных частиц высоких энергий в кристаллах при условиях плоскостного каналирования и квазиканалирования в аморфном веществе. Если предположить, что средний квадрат угла многократного рассеяния частиц пропорционален локальной плотности ядер, отношение средних квадратов угла рассеяния на ядрах в кристалле  $(\langle \Delta\theta_c^2 \rangle_n)$  и в аморфном веществе  $(\langle \Delta\theta_a^2 \rangle)$  определяется формулой

$$\gamma_n \equiv \frac{\langle \Delta\theta_c^2 \rangle_n}{\langle \Delta\theta_a^2 \rangle} = \frac{ZL'}{ZL' + L''} \int P_n(x) W(x) dx \quad (I)$$

где интегрирование проводится по траектории частицы,  $L'$ ,  $L''$  - радиационные логарифмы,  $Z$  - номер заряда ядра,  $W(x)$  - плотность вероятности нахождения частицы в точке с поперечной координатой  $x$ ,  $P_n(x)$  - плотность вероятности нахождения атомных ядер вдоль траектории движения частицы. Аналогично определяется отношение  $\bar{\nu}_{el}$  среднего квадрата угла многократного рассеяния на электронах кристалла  $\langle \Delta\theta_{el}^2 \rangle$  при каналировании к среднему квадрату угла многократного рассеяния в аморфном веществе  $\langle \Delta\theta_a^2 \rangle$ . Интегралы в выражениях для  $\bar{\nu}_n$  и  $\bar{\nu}_{el}$  в случае реалистичных потенциалов кристаллографических плоскостей могут быть рассчитаны только численно. При аппроксимации потенциала канала перевернутой параболой для электронов имеем

$$\bar{\nu}_n = \frac{ZL'}{ZL' + L''} \left( \sqrt{x} \ln \left[ \frac{1 + \sqrt{x}}{1 - \sqrt{x}} \right] \right)^{-1} \quad (2)$$

где  $x = \varepsilon_1 / U_0$  - отношение поперечной энергии частицы  $\varepsilon_1$  к глубине потенциальной ямы  $U_0$ . Кривые зависимостей  $\bar{\nu}_e$  и  $\bar{\nu}_s = \bar{\nu}_{el} + \bar{\nu}_n$  от поперечной энергии электронов, рассчитанные численно с использованием потенциала Мольера для атомов алмаза, приведены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, некогерентное многократное рассеяние электронов при плоскостном каналировании и квазиканалировании существенно зависит от их поперечной энергии. Заметим, что электроны с поперечными энергиями порядка высоты барьера испытывают подавленное многократное рассеяние. При этом подавляется как рассеяние на ядрах кристалла, так и рассеяние на электронах. На основе предложенной модели для зависимости угла многократного рассеяния от поперечной энергии частицы рассматри-

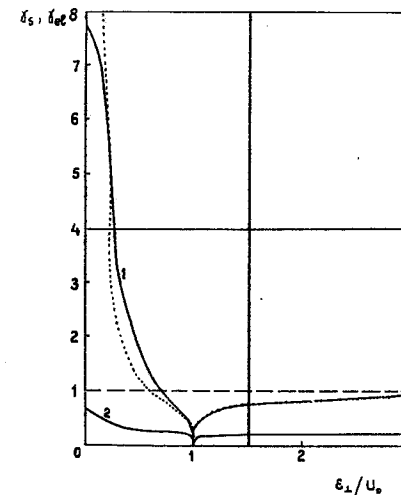


Рис. 1. Зависимость  $\bar{\nu}_s$  (сплошная кривая 1) и  $\bar{\nu}_{el}$  (сплошная кривая 2) от поперечной энергии  $\varepsilon_1$  (в единицах  $U_0$ ) в случае каналирования электронов плоскостями алмаза (110), рассчитанные с помощью потенциала Мольера. Для сравнения приведена зависимость  $\bar{\nu}_s$  (точечная кривая), вычисленная в приближении параболического потенциала с использованием формулы (2). В случае дезориентированного кристалла  $\bar{\nu}_s = 1$  (штриховая кривая).

ваются рассеяние и излучение электронов при плоскостном каналировании и квазиканалировании. Эволюция системы частиц после влета в кристалл исследуется как путем решения уравнения Фоккера-Планка для функции распределения частиц по поперечным энергиям, так и на основе динамических законов, т.е. путем решения уравнений движения отдельных частиц с последующим усреднением по начальным состояниям. Расчеты показывают, что при адекватном учете многократного рассеяния частиц при плоскостном каналировании и квазиканалировании, которое сильно

отличается от рассеяния в аморфном веществе, получается хорошее количественное согласие теоретических спектров излучения с экспериментом. На рис. 2 приведен спектр излучения электронов, влетающих в алмаз параллельно плоскостям (110). Следует отметить, что расчет, проведенный Бэйером и др. (пунктир на рис. 2) в приближении  $\beta_s = 1$ , дает завышенный вклад высокоэнергичных фотонов в излучение. Поскольку фотоны сравнительно низких энергий в основном обусловлены частицами с поперечными энергиями вблизи потенциального барьера, то результаты сравнения теории с экспериментом (точки на рис. 2) свидетельствуют о том, что упомянутые частицы составляли большую долю в эксперименте.

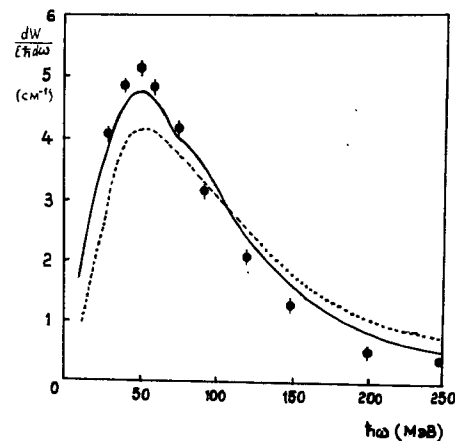


Рис. 2. Усредненный спектр излучения электронов с энергией 4,5 ГэВ при каналировании плоскостями (110) алмаза толщиной 100 мкм. Начальная угловая расходимость пучка равна  $5 \cdot 10^{-5}$  рад.

Анализ динамики показывает, что имеется существенное различие в угловых распределениях электронов, прошедших через кристалл в режиме плоскостного каналирования и через эквивалентное аморфное вещество. Проведен расчет зависимости средних квадратов компонент поперечной скорости  $\overline{V_x^2}$  и  $\overline{V_y^2}$ , перпендикулярной и параллельной плоскости каналирования, от глубины проникновения в кристалл. На малых толщинах из-за рассеяния на плоскости (в приближении непрерывного потенциала), величина  $\overline{V_x^2}/c^2$  намного больше среднего квадрата угла многократного рассеяния в эквивалентном аморфном веществе. Однако, с увеличением глубины проникновения величина  $\overline{V_x^2}$  в случае кристалла растет медленно и постепенно становится меньше соответствующей величины в случае аморфного вещества. При толщинах порядка одного миллиметра для электронов с энергией 5 ГэВ, влетающих в алмаз параллельно плоскостям (110), величина  $\overline{V_x^2}$  составляет 60% от соответствующего значения для эквивалентного аморфного вещества.

На основе численного моделирования траекторий заряженных частиц при малых углах движения относительно кристаллографических плоскостей получены зависимости числа каналированных электронов от глубины проникновения в кристалл. Показано, что число каналированных электронов достаточно велико даже на больших глубинах (20% от полного числа электронов с энергией ~5 ГэВ в алмазе на толщине 1 мм). Заметим, однако, что практически все эти частицы захватываются в канал в результате некогерентного рассеяния.

Проведен расчет спектров излучения электронов при плоскостном каналировании и квазиканалировании в толстых кристал-

лах. Результаты расчета спектров излучения электронов с энергией 4,5 ГэВ в кристаллах алмаза 1 мм и 1,7 мм сравниваются как с более ранними теоретическими расчетами, проведенными в более простых моделях, так и с соответствующими экспериментальными данными.

В заключении второй главы проведен детальный анализ влияния некогерентного рассеяния на спектры излучения частиц при каналировании и квазиканалировании. Показано, что некогерентное рассеяние в направлении, перпендикулярном к плоскости траектории частицы, приводит к смещению пиков излучения частиц в более мягкую область. Этим можно объяснить ранее имевшееся расхождение теоретических и экспериментальных значений максимумов в спектре ультрарелятивистских позитронов при плоскостном каналировании в кристаллах алмаза и кремния.

Третья глава диссертации содержит результаты численного моделирования траекторий ультрарелятивистских электронов и позитронов в поле двумерного непрерывного потенциала кристаллографических осей  $U(\vec{\rho})$ . В приближении непрерывного потенциала кристаллографических осей движение частиц в плоскости, перпендикулярной осям, с точностью до величин порядка квадрата отношения глубины потенциальной ямы осей  $U_0$  к энергии частицы  $E$  описывается уравнениями

$$\frac{E}{c^2} \frac{d^2 \vec{\rho}}{dt^2} = -\vec{\nabla} U(\vec{\rho}) \quad (3)$$

где  $\vec{\rho}$  - координата частицы в поперечной плоскости,  $c$  - скорость света. Продольная скорость ультрарелятивистской частицы определяется из уравнения

$$\frac{dz}{dt} = c \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \gamma^{-2} + \left( \frac{V_{\perp}}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

где  $\vec{V}_{\perp} = \frac{d\vec{\rho}}{dt}$ . Полная энергия частицы  $E$  при этом зависит от времени согласно уравнению

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{2e^2}{3m_0^2 c^3} \left( \frac{E}{m_0 c^2} \right)^2 |\vec{\nabla} U(\vec{\rho})|^2 \quad (5)$$

Моделирование прохождения пучка частиц через кристалл состоит в многократном решении системы уравнений (3)–(5) при варьировании координаты точки влета, которая является случайной величиной с равномерным распределением внутри плоской элементарной ячейки кристалла. При этом уравнения движения (3)–(5) должны быть дополнены начальными условиями

$$\vec{\rho}(0) = \rho_0, \quad \frac{dz}{dt}(0) = 0, \quad \frac{d\vec{\rho}}{dt}(0) = V_{\perp 0}, \quad E(0) = E_0$$

Расчет потенциала кристалла  $U(\vec{\rho})$  проводился в приближении непрерывных осей Мольера-Эплтона. Решение уравнений (3)–(5) помимо траекторий частиц позволяет одновременно найти интегральные потери энергии на излучение в результате прохождения частиц через кристалл.

На основе полученных траекторий проведен детальный анализ распределений частиц по углам вылета из кристалла. При определенных толщинах, различных для электронов и позитронов и зависящих от угла их влета относительно кристаллографических осей, угловые распределения вылетающих частиц имеют кольцеобразную форму. Азимутальное распределение поперечной скорости частиц на выходе из кристалла зависит от угла поворота частицы в поперечной плоскости при взаимодействии с каждой осью, а также от числа таких взаимодействий (толщины кристалла). Например,

при толщине кристалла алмаза  $l = 5$  мкм, угле падения относительно осей  $\langle 110 \rangle$ ,  $\theta_0 = 1,5 \cdot 10^{-4}$  рад. и энергии  $E = 10$  ГэВ ни один из 500 разыгранных электронов не успевает вернуться в плоскости, ортогональной осям  $\langle 110 \rangle$ , на угол, близкий к  $\pi$ . При большей толщине в 20 мкм появляется уже заметная доля таких электронов. Однако, если увеличивать угол входа до  $3 \cdot 10^{-4}$  рад., то взаимодействие электронов с осями ослабевает и даже при толщине кристалла в 20 мкм азимутальный угол поворота не достигает величины  $\pi$ .

Чем больше угол влета относительно кристаллографических осей, тем меньше относительно ширина допустимых углов вылета.

По полученным траекториям частиц в кристалле путем численного интегрирования формулы классической электродинамики для спектрально-углового распределения вычислено спектральное распределение энергии излучения ультрарелятивистских электронов и позитронов. Положение максимумов спектров излучения на расчетной кривой хорошо согласуется с экспериментом.

В четвертой главе на основе численного моделирования траекторий ультрарелятивистских частиц проведен анализ динамики и характеристик излучения электронов и позитронов в переходной области от осевого каналирования к плоскостному. Исследован механизм усиления рассеяния на непрерывном потенциале оси при углах порядка критического угла каналирования, приводящий к заметному уширению углового распределения полных потерь на излучение. Теоретически наблюдается явление минимума радиационных потерь энергии релятивистских электронов при угле влета

$\theta_0$  относительно кристаллографических осей, примерно равном углу Линдхарда  $\theta_L^{(s)}$ . Из проведенного анализа угловых распре-

делений полных потерь каналированных и квазиканалированных частиц следует, что минимум радиационных потерь при углах влета  $\theta_0 \sim \theta_L^{(s)}$  обусловлен двумя причинами. Первое, что при углах  $\theta_0 \sim \theta_L^{(s)}$  имеется больший сравнительно с другими углами влета процент квазиканалированных частиц, которые по сравнению как с каналированными в оси, так и в плоскости мало излучают. Вторая причина связана с относительно большим угловым разбросом фотонов, излученных надбарьерными частицами. Действительно, с уменьшением угла коллимации минимум в радиационных потерях заметно углубляется. Проведенный расчет показывает, что электроны в режиме осевого каналирования теряют примерно 3-4 раза (алмаз,  $E = 4,5$  ГэВ) больше, чем при надбарьерном движении. В режиме же плоскостного каналирования полные потери больше, чем для случая квазиканалирования на 10-20% (рис. 3).

Результаты аналогичных расчетов для позитронов показывают, что здесь наблюдается обратная картина. При критическом угле влета кривая полных радиационных потерь позитронов имеет максимум. Это обусловлено тем, что позитроны, имеющие поперечные энергии, сравнимые с высотой потенциальных барьеров, могут ближе подойти к осям и двигаться в области больших полей, и тем самым больше терять энергию на излучение. Проведены также расчеты полных потерь электронов и позитронов в зависимости от азимутального угла влета, а также от угла коллимации излученных фотонов. Получены распределения средних расстояний до ближайшей оси.

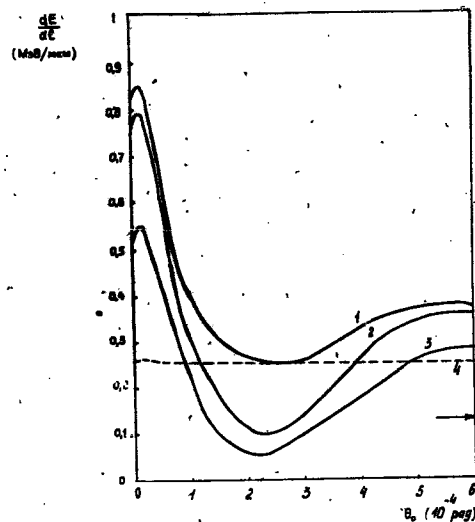


Рис. 3. Полные потери энергии электронов с энергией 4,5 ГэВ на единице пути в зависимости от угла влета  $\theta_0$  в кристалл алмаза относительно осей  $\langle 100 \rangle$  для некоторых значений угла коллимации  $\theta_k$  регистрируемого излучения. Кривые 1, 2, 3 соответствуют  $\gamma\theta_k = 10; 2; 1,2$ . Кривая 4 соответствует энергетическим потерям надбарьерных электронов на единице пути. Стрелкой указано значение потерь в аморфной среде.

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

I. Проведено сравнение теоретических расчетов спектров излучения электронов и позитронов с энергиями 2-55 ГэВ при плоскостном каналировании в кристаллах алмаза и кремния с экспериментальными результатами. Показано, что некогерентное рассеяние на атомах среды может существенно изменить спектры излучения даже при относительно малых толщинах.

2. Показано, что спектр излучения позитронов при каналировании в плоскостях (111) даже при малых энергиях (дипольное приближение) имеет двухпиковую структуру. Двойной пик уже при первой гармонике объясняется специфическим неравномерным удалением кристаллографических плоскостей при такой ориентации.
3. Показано, что многократное рассеяние в кристалле при движении частиц под малыми углами относительно кристаллографических плоскостей может существенно отличаться от многократного рассеяния частиц в аморфном веществе. При этом средний квадрат угла многократного рассеяния при плоскостном каналировании существенно зависит от поперечной энергии частицы в канале. В частности, электроны, находящиеся вблизи дна потенциальной ямы, испытывают усиленное многократное рассеяние, почти на порядок большее, чем в эквивалентном аморфном веществе. Для электронов же с поперечными энергиями порядка величины высоты потенциального барьера многократное рассеяние подавлено.
4. Путем решения уравнения Фоккера-Планка, при аппроксимации потенциала непрерывных плоскостей приближением Мольера-Эплтона, найдены функции распределения электронов по поперечным энергиям в зависимости от глубины проникновения в кристалл. Показано, что учет многократного рассеяния может изменить форму спектра уже при малых толщинах кристалла.
5. Проведенный численный расчет средних квадратов углов многократного рассеяния пучка электронов в поперечной к направлению движения плоскости. Показано, что отношение среднего квадрата углового распределения вылетающих из кристалла

электронов в случае плоскостного каналирования и квазиканалирования и при движении в эквивалентном аморфном веществе постепенно уменьшается с глубиной проникновения и при определенных толщинах становится меньше единицы.

6. Проведено численное моделирование траекторий частиц с учетом многократного рассеяния при плоскостном каналировании и квазиканалировании. Показано, что частицы, находящиеся в канале при больших глубинах проникновения, — это частицы, которые обратно захватились в канал в результате некогерентного рассеяния на тепловых колебаниях атомов среды.
7. Показано, что угловое распределение вылетающих частиц при осевом квазиканалировании, вследствие установления азимутальной симметрии, имеет при определенных толщинах кристалла вид кольца. При этом скорость установления азимутальной симметрии в угловых распределениях вылетающих частиц зависит как от знака заряда, так и от угла их влета в кристалл относительно кристаллографических осей.
8. Проведено сравнение рассчитанных спектров излучения электронов и позитронов в режиме осевого каналирования и квазиканалирования с соответствующими экспериментальными данными. Анализ результатов показывает, что разработанный метод численного расчета траекторий и характеристик излучения может быть успешно использован для теоретического описания экспериментальных результатов.
9. Показано, что радиационные потери энергии электронов принимают минимальное значение, когда угол влета электронов в кристалл относительно кристаллографических осей становится примерно равным критическому углу Линдхарда. Минимум в

радиационных потерях электронов в переходной области от осевого каналирования к плоскостному объясняется возрастанием доли надбарьерных частиц, которые испытывают по сравнению с каналированными заметно меньшие потери на излучение.

10. Угловое распределение полных потерь на излучение существенно зависит от угла влета частиц относительно кристаллографических осей. Ширина углового распределения излучения максимальна в переходной области между режимами осевого и плоскостного каналирования. Это приводит к тому, что при коллимации излучения минимум в радиационных потерях еще более углубляется.

Основные материалы опубликованы в следующих работах:

1. Авакян А.Р., Глебов В.И., Головизнин В.В., Жеваго Н.К., Ян Ши Численное моделирование траекторий и характеристик излучения частиц высоких энергий в усредненном потенциале осей кристалла. — Препринт ЕФИ-595(82)-82, Ереван 1982.
2. Авакян А.Р., Глебов В.И., Жеваго Н.К. Ян Ши Явление минимума радиационных потерь энергии релятивистских электронов в кристалле. — Препринт ЕФИ-514(1)-82, Ереван 1982.
3. Avakian A.R., Glebov V.I., Goloviznin V.V., Yang S., Zhevago N.K. Computer simulation of trajectories and radiation from high energy particles moving in averaged potential of crystal axes. — Rad. Eff., 1984, v. 80, p. 141-152.
4. Авакян А.Р., Жеваго Н.К., Ян Ши Расчет спектров излучения позитронами и электронами больших энергий при плоскостном каналировании в кристаллах типа алмаза. — Изв. АН

Арм.ССР, Физика, 1985, т. 20, № 4, с. 191-199.

5. Авакян А.Р., Глебов В.И., Головизнин В.В., Жеваго Н.К., Ян Ши Радиационные потери энергии релятивистских электронов и позитронов в кристаллах. - Изв. АН Арм.ССР, Физика, 1985, т. 20, № 2, с. 59-64.
6. Авакян А.Р., Жеваго Н.К., Ян Ши Угловое распределение радиационных потерь энергии релятивистских электронов в монокристалле. - Изв. АН Арм.ССР, Физика, 1985, т. 20, № 5, с. 252-258.
7. Авакян А.Р., Белошицкий В.В., Кумахов М.А. Подавление многократного рассеяния при плоскостном каналировании отрицательных частиц. - Письма в ЖТФ, 1985, т. II, № II, с. 641-643.
8. Авакян А.Р., Белошицкий В.В., Ян Ши Излучение и многократное рассеяние электронов высоких энергий при планарном каналировании. - Препринт ЕФИ-831(58)-85, Ереван 1985.

Технический редактор А.С.Абрамян

---

Подписано в печать 26.08.86г. ВФ - 06312 Формат 60x84/16  
Офсетная печать. Уч.изд.л.0,5 Тираж 190 экз.  
Зак.тип.№ 465

---

Отпечатано в Ереванском физическом институте  
Ереван 36, Маркаряна 2