

На правах рукописи

Богданов Олег Викторович

ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ  
ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ ПРИ (111) ПЛОСКОСТНОМ  
КАНАЛИРОВАНИИ В ТОНКИХ КРИСТАЛЛАХ

Специальность 01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2008

Работа выполнена на кафедре высшей математики и математической физики факультета естественных наук и математики Томского политехнического университета.

**Научный руководитель:** профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики Томского политехнического университета, доктор физико-математических наук Пивоваров Юрий Леонидович

**Официальные оппоненты:** профессор кафедры теоретической физики Томского государственного университета, доктор физико-математических наук Бордовицын Владимир Александрович;

проректор по международным связям Томского государственного педагогического университета, доктор физико-математических наук Эпп Владимир Яковлевич

**Ведущая организация:** Институт сильноточной электроники  
ТФ СО РАН (г. Томск)

**Защита состоится** «20» ноября 2008 г. в « 14.30 » часов на заседании диссертационного совета Д 212. 267.07 в Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2008 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

И. В. Ивонин

# 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## 1.1 Актуальность темы

Физика ориентационных эффектов, среди которых наиболее известным является каналирование заряженных частиц в кристаллах, представляет собой быстро развивающееся направление. Исследования в этой области интенсивно ведутся во многих научных лабораториях мира.

С помощью эффекта каналирования можно изучать тепловые колебания и смещения атомов в решетке, распределение электронной плотности в межатомном пространстве кристаллов. В последнее время изучается возможность использования каналирования для создания эффективных систем управления пучками частиц высоких энергий. Каналирование легких частиц – электронов и позитронов – может быть использовано для получения интенсивного монохроматического рентгеновского и гамма-излучения.

Классическая и квантовая теория излучения релятивистских заряженных частиц при плоскостном каналировании в кристаллах изложена в монографиях [1–5]. Однако за бортом теоретических исследований остался случай излучения при плоскостном каналировании вдоль так называемых двойных плоскостей (111) в кристаллах со сложным базисом. Это связано со следующими причинами:

- потенциал системы двойных плоскостей сложен,
- аналитическое решение уравнения движения в таком потенциале найти невозможно.

Поэтому в работе выбран метод исследования спектрально-угловых характеристик излучения при каналировании релятивистских электронов и позитронов в кристаллах, основанный на численном решении уравнений движения и дальнейшем использовании найденных траекторий для построения спектров излучения.

В последнее время проведен ряд новых экспериментов по исследованию спектров излучения при плоскостном каналировании электронов в кристаллах\*, кроме того, планируются новые эксперименты на пучках релятивистских электронов и позитронов в LNF Frascati (Italy).

Это определяет актуальность и практическую значимость темы диссертации.

## 1.2 Цель работы

Цель диссертации состоит в том, чтобы провести теоретическое исследование спектрально-угловых характеристик излучения при плоскостном каналировании релятивистских электронов и позитронов в тонких кристаллах со сложным базисом.

---

\* H. Backe, P. Kunz, W. Lauth, A. Rueda. Planar channeling experiments with electrons at the 855 MeV Mainz Microtron MAMI // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B.* –2008–V 266, issue 17.– P 3835-3851

Поставлены следующие задачи:

- Реализовать метод численного построения (пакет Mathematica 6.01) траекторий движения релятивистских электронов и позитронов для (100)- и (111)-каналирования в кристаллах Si и LiF с использованием непрерывных потенциалов плоскостей, рассчитанных с использованием аппроксимации электронного форм-фактора рассеяния типа Doyle-Turner [6].
- В рамках классической электродинамики на основе построенных траекторий исследовать спектрально-угловые характеристики излучения каналированных электронов и позитронов в тонких кристаллах Si и LiF.
- Провести усреднение по траекториям (по точкам влета в кристалл) и исследовать ориентационную зависимость формы спектра излучения релятивистских электронов и позитронов при (111)- и (100)-каналировании в кристаллах Si и LiF как функцию угла падения к плоскостям каналирования и энергии частиц от 100 до 2000 МэВ.
- Исследовать особенности спектров излучения при (100)- и (111)-каналировании релятивистских электронов и позитронов в тонком кристалле Si, когда в зависимости от точки и угла влета в кристалл частицы совершают небольшое число колебаний в плоскостном канале, причем не обязательно целое – эффект «хвостов» траекторий.

### 1.3 Научная новизна результатов

1. Впервые в рамках классической электродинамики, проведено систематическое исследование спектрально-угловых характеристик излучения релятивистских электронов и позитронов при (111)-плоскостном каналировании в тонких кристаллах Si и LiF на основе разработанного метода численного (пакет Mathematica 6.01) построения траекторий движения релятивистских электронов и позитронов в кристаллах.

2. Впервые исследована эволюция спектров излучения релятивистских электронов и позитронов в режиме плоскостного каналирования в системе двойных плоскостей в кристалле Si в зависимости от угла падения к плоскостям каналирования и увеличения энергии частиц от 100 до 2000 МэВ.

3. Впервые показано, что при расчете спектров излучения при (100)- и (111)-каналировании в тонких кристаллах Si принципиальным является учет влияния «хвостов» траекторий релятивистских электронов и позитронов на спектры излучения.

4. Впервые исследована эволюция спектров излучения релятивистских электронов и позитронов при (111)-плоскостном каналировании в ионном кристалле LiF в зависимости от угла падения к плоскостям каналирования и увеличении релятивистского фактора  $\gamma$  от 100 до 2000.

## **1.4 Научно-практическая ценность работы**

Результаты, полученные в диссертации, используются при подготовке планирующихся экспериментов на пучках релятивистских электронов и позитронов LNF Frascati (Italy) с энергиями  $20 \div 800$  МэВ [6] в рамках коллаборации ТПУ – LNF и для интерпретации экспериментальных данных, полученных в 2007 г. на разрезном микротроне MAMI (Mainz, Germany) .

## **1.5 Основные положения, выносимые на защиту**

1. Сравнительный анализ формы спектров излучения релятивистских электронов и позитронов при (100)- и (111)-каналировании в кристалле Si. Показано, что при угле влета релятивистских электронов и позитронов к (111)-плоскостям каналирования, не превосходящем критического угла Линдхарда, форма спектра характеризуется двумя резко выраженными максимумами. Выход излучения релятивистских электронов и позитронов при (111)-каналировании более чем в 5 раз больше, чем при (100)-каналировании в кристаллах Si.
2. Эффект влияния «хвостов» траекторий релятивистских электронов и позитронов при (100)- и (111)- каналировании в тонком кристалле на форму спектра излучения при увеличении энергии частиц от 800 до 2000 МэВ. Установлено, что при фиксированной толщине кристалла эффект усиливается с увеличением энергии частиц и более выражен для позитронов по сравнению с электронами.
3. Исследование эволюции формы спектров излучения электронов и позитронов при (111)-каналировании в ионном кристалле LiF при увеличении релятивистского фактора  $\gamma$  от 107 до 2000 и сравнительный анализ формы спектров излучения канализованных электронов, рассчитанных в рамках классической и квантовой электродинамики.

## **1.6 Достоверность научных результатов и выводов**

Достоверность сформулированных в диссертации положений и выводов подтверждается качественным согласием полученных результатов (в предельных случаях) с результатами других авторов, а также сравнением с имеющимися экспериментальными данными. Тестирование в численных расчетах (Mathematica 6.01) проводилось стандартными методами.

## **1.7 Личный вклад соискателя**

В работах, выполненных в соавторстве, соискатель принимал активное участие: в проведении расчетов, обработке и анализе результатов, в подготовке статей к публикации. Совместно с Пивоваровым Ю.Л. принимал участие в постановке задач. Все основные результаты диссертации получены лично автором.

## 1.8 Апробация работы

Результаты работы обсуждались на научных семинарах кафедр теоретической и экспериментальной физики и высшей математики и математической физики Томского политехнического университета, докладывались на следующих конференциях:

1. VII International Symposium "RREPS-07" Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures September 24-29, 2007, Prague, Czech Republic.
2. XXXVII и XXXVIII Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва: МГУ, май, 2007, 2008.
3. XXV International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, July 25 – 31, Freiburg, Germany, 2007.
4. XVI и XVII International Synchrotron Radiation Conference, Novosibirsk, Russia, 2006, 2008.
5. The 3rd International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena – Channeling 2008, October 25 – November 1, Erice (Trapani - Sicily), Italy, 2008.

**1.9 Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 6 статьях в рецензируемых журналах, 1 препринте LNF Frascati (Italy), а также в 10 тезисах докладов международных конференций.

**1.10 Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем диссертации составляет 100 страниц, включая рисунки и список цитируемой литературы. Диссертация содержит 35 рисунков и 9 таблиц. Список литературы включает в себя 110 наименований.

## 2 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели работы, указана новизна результатов, приведена структура и содержание диссертации, перечислены защищаемые положения.

В **первой главе** введен механизм расчета спектров излучения каналированных релятивистских электронов и позитронов в кристалле.

В § 1.1 представлены результаты расчетов потенциалов, управляющих движением электронов и позитронов при плоскостном каналировании. Проводится сравнение потенциала типа «перевернутая парабола» [1] с потенциалом отдельной плоскости, аппроксимированным по типу Пешля – Теллера; потенциалом с аппроксимацией атомного фактора рассеяния типа Doyle-Turner и более точной аппроксимацией, предложенной в работе [6]. Рассчитанные по методу [6] периодические потенциалы для (111)-плос-

костного каналирования электронов и позитронов в кристалле Si представлены на рис. 1 и 2.

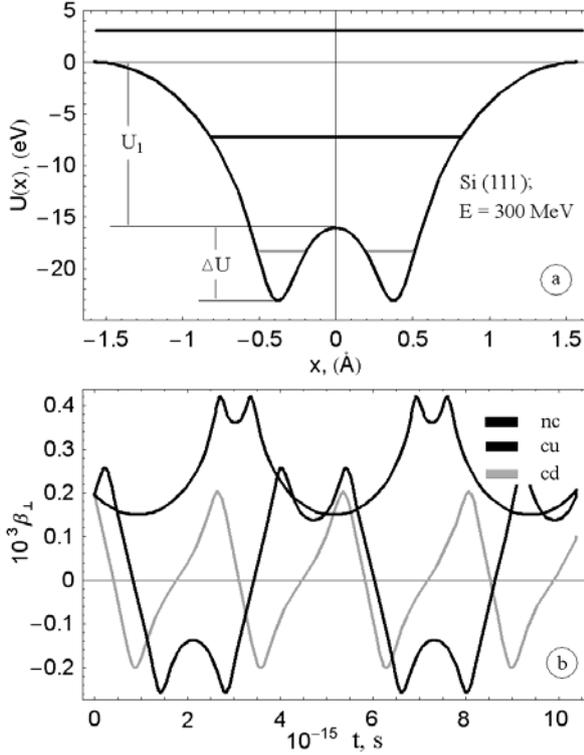


Рис. 1. Потенциальная энергия электрона в системе двойных плоскостей (111) Si и три значения поперечной энергии, соответствующие трем типам движения (a); зависимость поперечной скорости  $\beta_{\perp} = \dot{x}/c$  от времени для трех указанных значений поперечной энергии (b)

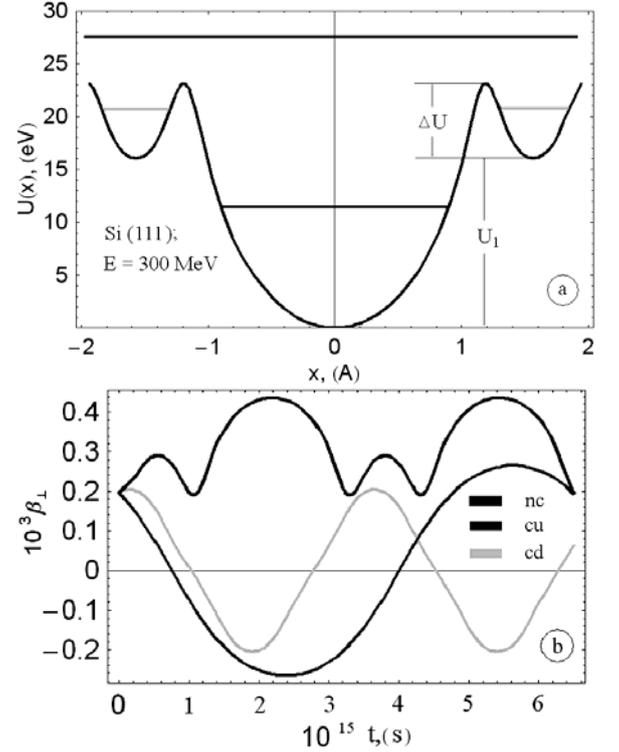


Рис. 2. Потенциальная энергия позитрона в системе двойных плоскостей (111) Si и три значения поперечной энергии, соответствующие трем типам движения (a); зависимость поперечной скорости  $\beta_{\perp} = \dot{x}/c$  от времени для трех указанных значений поперечной энергии (b)

В § 1.2 описаны используемые методы расчета интенсивности излучения при плоскостном каналировании релятивистских от 100 до 2000 МэВ электронов и позитронов.

1) В случае тонких кристаллов (при пересечении кристалла количество поперечных колебаний в канале невелико) используется формула

$$\frac{d^2\varepsilon}{d\Omega d\omega} = \frac{e^2}{4\pi^2 c} \left| \int_0^{\tau} \frac{\mathbf{n} [(\mathbf{n} - \boldsymbol{\beta}) \dot{\boldsymbol{\beta}}]}{(1 - \mathbf{n}\boldsymbol{\beta})^2} e^{i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})} dt \right|^2. \quad (1)$$

здесь  $c$  – скорость света;  $e$  – заряд электрона,  $\mathbf{r}(t) = \boldsymbol{\beta}_{\parallel} ct + \mathbf{r}_{\perp}(t)$  – радиус-вектор;  $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{r}/c$  – средняя скорость движения;  $\mathbf{r}_{\perp}(t)$  – периодическая функция с периодом  $T$ , которая находится путем решения уравнения движения в поперечном к плоскостям направлении каналированных электронов и позитронов,  $\mathbf{k} = \omega \mathbf{n}/c$  – волновой вектор;  $t' = t + R/c - \mathbf{n}\mathbf{r}(t)/c$ ;  $\mathbf{n}$  – единичный вектор, задающий направление вылета фотонов;  $\tau$  – время пролета электрона/позитрона через кристалл.

Эта формула используется далее в главе 2 при учете влияния «хвостов» траекторий релятивистских электронов и позитронов на форму спектра при (100) и (111) каналировании в тонком кристалле Si.

2) В случае большого количества поперечных колебаний в канале за время движения в кристалле используется формула

$$\frac{dW}{d\omega dz} = \frac{e^2 \omega}{c^4 T^2} \sum_{n=1}^{\infty} \Theta \left( 1 - \frac{\omega T}{2\pi n \gamma^2} \right) \left( 1 - \frac{T\omega}{2\pi \gamma^2 n} + \frac{1}{2} \left( \frac{T\omega}{2\pi \gamma^2 n} \right)^2 \right) |v_{\tilde{\omega}}^T|^2, \quad (2)$$

$$\tilde{\omega} = \frac{2\pi n}{T}, \quad v_{\tilde{\omega}}^T = \int_0^T v_{\perp}(t) e^{i\tilde{\omega}t} dt.$$

где  $\gamma$  – релятивистский фактор,  $v_{\tilde{\omega}}^T$  – Фурье-компонента скорости,  $T$  – период колебаний электрона (позитрона). Формула (2) также удобна тем, что представляет собой сумму по гармоникам и может использоваться для анализа парциальных вкладов отдельных гармоник в полный спектр излучения при каналировании электронов (позитронов).

Этот подход использован в гл. 3 для анализа спектров излучения в системе двойных плоскостей в кристалле Si (кристаллическая решетка типа алмаз) и в главе 4 – для анализа спектров излучения в ионном кристалле LiF (с кубической кристаллической решеткой).

В конце первой главы приводятся основные выводы.

Во **второй главе** впервые поставлена и решена проблема учета «хвостов» траекторий релятивистских электронов и позитронов при расчете спектров излучения при плоскостном каналировании в тонком кристалле. Исследовано спектрально-угловое излучение при каналировании электронов и позитронов в тонких кристаллах. Исследована эволюция спектров излучения в зависимости от энергии каналированных релятивистских электронов и позитронов, а также от толщины кристаллической мишени  $L$  в диапазоне от 1 до 10 мкм.

В § 2.1 проведены расчеты спектров излучения для отдельных траекторий электронов и позитронов при увеличении энергии в диапазоне от 800 до 2000 МэВ. Указаны особенности в форме спектров излучения для каналированных релятивистских электронов и позитронов. Показано, что в отличие от излучения электронов основное излучение при (111)-каналировании в кристалле Si позитронов приходится на первую гармонику.

В § 2.2 рассчитаны спектры излучения при (100) каналировании электронов и позитронов, усредненные по точкам влета кристаллическую мишень для диапазона энергий от 800 до 2000 МэВ.

Все расчеты (рис. 3 и 4) выполнены как с учетом (кривые real), так и без учета (кривые ideal) «хвостов» траекторий релятивистских электронов и позитронов при плоскостном каналировании в кристалле. Численные расчеты показывают, что эффект влияния учета «хвостов» траекторий при каналировании релятивистских электронов позитронов в кри-

сталле при фиксированной толщине кристалла возрастает с увеличением энергии частиц. Показано, что эффект более выражен для позитронов, это связано с особенностью потенциала позитронов при (100)-каналировании.

В § 2.3 дано сравнение усредненных по точкам влета спектров релятивистских электронов и позитронов при (100)- и (111)-каналировании. На основе введенных относительной  $\delta = 1 - \left\langle \frac{d\varepsilon_{ideal}}{d\Omega d\omega} \right\rangle / \left\langle \frac{d\varepsilon_{real}}{d\Omega d\omega} \right\rangle$  и интегральной  $Y = \int (d\varepsilon/d\Omega d\omega) d\hbar\omega$  характеристик излучения проводится сравнение формы спектра каналированных релятивистских электронов и позитронов с учетом (кривые real) и без учета (кривые ideal) «хвостов» траекторий для диапазона энергий от 800 до 2000 МэВ. Величины  $\delta$  и  $Y$  оказываются больше для позитронов, что связано главным образом с ангармоничностью потенциальной энергии позитронов для высоких значений поперечной энергии.

В конце второй главы сформулированы основные результаты.

В § 2.4 рассмотрены особенности излучения «вперед» релятивистских электронов и позитронов при (111)-каналировании в кристалле Si. Показано, что при угле падения  $\theta_0 = 0$  к (111) плоскостям каналирования спектры содержат два основных максимума, а также побочные максимумы, обусловленные вкладом гармоник более высокого порядка (рис. 4).

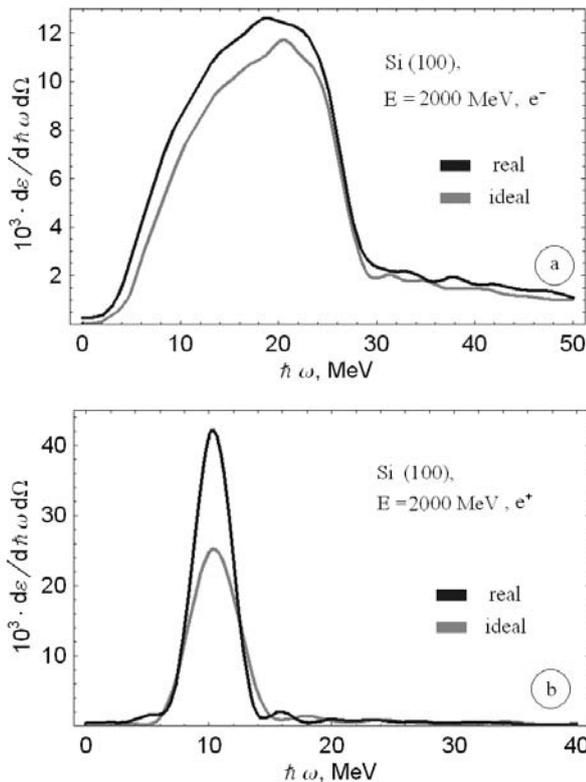


Рис. 3. Усредненное по точкам влета спектрально-угловое распределение излучения при (100)-каналировании в кристалле Si,  $E = 2000 \text{ МэВ}$ ,  $L = 10 \text{ мкм}$ : а) электронов, б) позитронов.

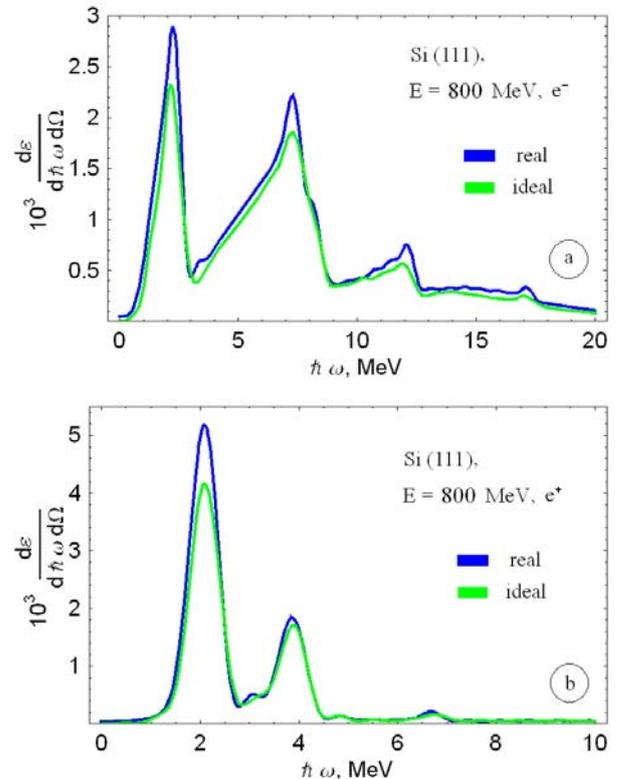


Рис. 4. Усредненное по точкам влета спектрально-угловое распределение излучения при (111)-каналировании в кристалле Si,  $E = 800 \text{ МэВ}$ ,  $L = 10 \text{ мкм}$ : а) электронов, б) позитронов.

В третьей главе поставлена и решена задача расчета спектров излучения для (111)-каналирования в тонком кристалле. Показаны особенности формы спектра излучения, возникающие при (111)-каналировании в сравнении с (100)-каналированием. Исследована эволюция спектров каналированных электронов и позитронов при увеличении энергии частиц от 100 до 800 МэВ и увеличении угла падения к плоскостям каналирования кристалла кремния.

В § 3.1 проведены расчеты спектральной интенсивности излучения каналированных электронов. Путем численного решения уравнения движения при (111)-каналировании электронов рассчитаны характерные траектории, возникающие при движении вблизи плоскостей каналирования. Для углов падения электрона к (111)-плоскостям каналирования, превосходящих критический угол Линдхарда, указаны условия, при которых вместо двух (как при (100)- и (110)-каналировании) существуют три типа решений уравнения движения. Далее на основе полученных решений уравнения движения релятивистских электронов строятся спектры излучения при (111)-каналировании в зависимости от типа траектории.

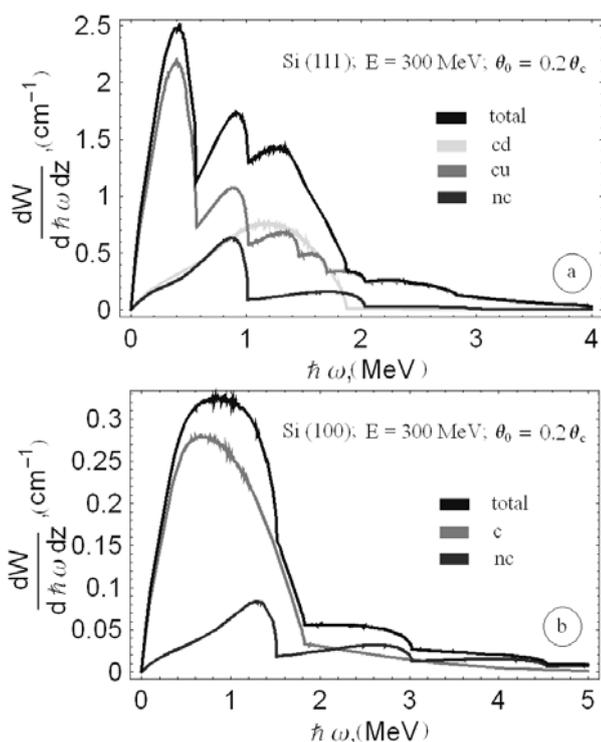


Рис. 5. Спектр излучения каналированных электронов при угле влета в кристалл Si  $\theta_0 = 0,2\theta_c$  относительно плоскостей: а) (111); б) (100). Каждый спектр (total) представлен суммой трех компонент, соответствующих трем видам движения

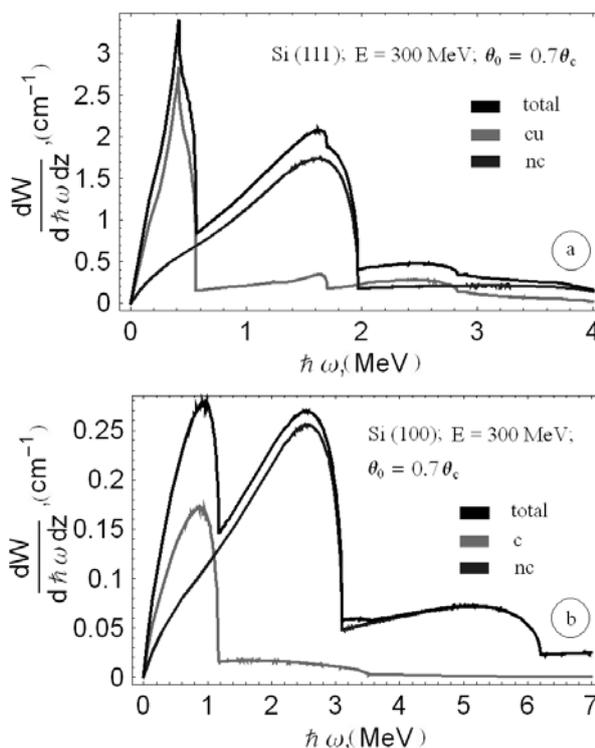


Рис. 6 Спектр излучения каналированных электронов при угле влета в кристалл Si  $\theta_0 = 0,7\theta_c$  относительно плоскостей: а) (111); б) (100). Каждый спектр (total) представлен суммой трех компонент, соответствующих трем видам движения

В § 3.1.1 исследована эволюция спектров излучения при изменении угла влета каналированных  $e^-$  с энергией 300 МэВ в кристалл относительно (100)- и (111)-плоскостей. Здесь рассматриваются усредненные по точкам влета в кристалл спек-

тры излучения каналированных релятивистских электронов. Расчеты проведены для диапазона углов от 0 до  $1,5\theta_c$ .

Сравнение спектров излучения при (111) и (100) каналировании для углов влета в кристалл  $\theta_0 = 0,2\theta_c$ ,  $\theta_0 = 0,7\theta_c$  приведено на рис. 5 и 6.

Таблица 1

Тип траектории	Поперечная энергия	Период
$cd$	$-U_0 \leq \varepsilon_{\perp} \leq -U_1$	$T_{cd}$
$cu$	$-U_1 \leq \varepsilon_{\perp} \leq 0$	$T_{cu}$
$nc$	$0 \leq \varepsilon_{\perp}$	$T_{nc}$

Классификация типов движения (111)-каналированных электронов представлена в табл. 1. Тип движения  $cd$  будет существовать для диапазона углов падения  $\theta_0 = 0 \div \theta_{sc}$ , где

$$\theta_{sc} = \sqrt{\frac{2\Delta U}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\Delta U}{U_0}}\theta_c. \quad (3)$$

Здесь введен субкритический угол  $\theta_{sc}$ , в случае (111) каналирования в кристалле Si  $\theta_{sc} = 0,552\theta_c$ .

В § 3.1.2 исследована эволюция формы усредненных спектров излучения при увеличении энергии каналированных  $e^-$  для диапазона энергий от 500 до 700 МэВ.

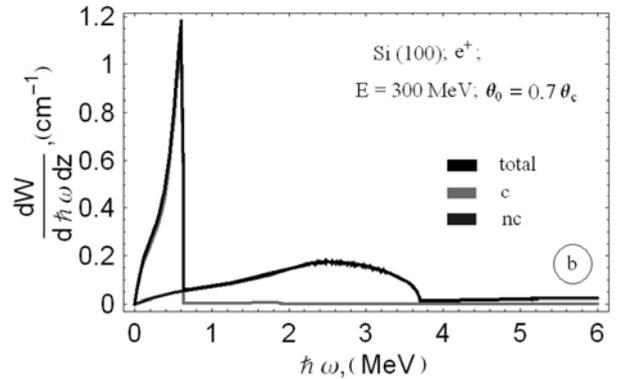
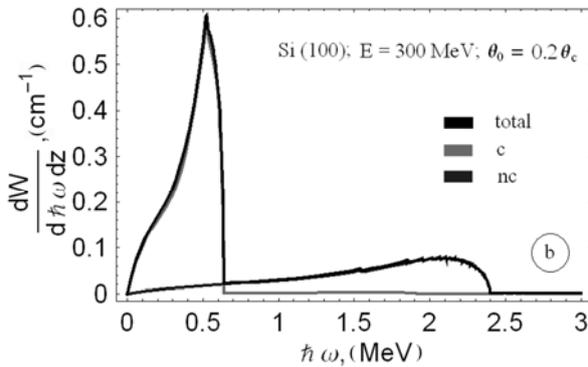
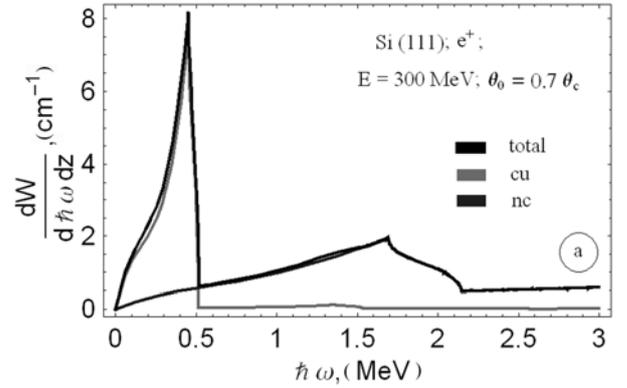
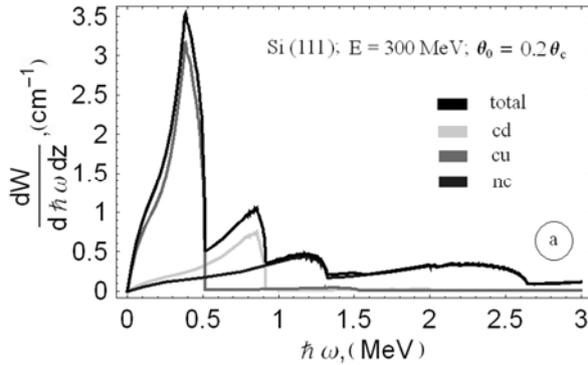


Рис. 7. Спектр излучения каналированных позитронов при угле влета в кристалл Si  $\theta_0 = 0,2\theta_c$  относительно плоскостей: а) (111); б) (100). Каждый спектр (total) представлен суммой трех компонент, соответствующим трем видам движения

Рис. 8. Спектр излучения каналированных позитронов при угле влета в кристалл Si  $\theta_0 = 0,7\theta_c$  относительно плоскостей: а) (111); б) (100). Каждый спектр (total) представлен суммой трех компонент, соответствующим трем видам движения

В § 3.2 проведены расчеты спектральной интенсивности излучения каналированных позитронов. Путем численного решения уравнений движения для (111)-каналирования позитронов рассчитаны характерные траектории, возникающие при движении вблизи плоскостей каналирования. Для углов падения позитронов к (111)-плоскостям каналирования, превосходящих критический угол Линдхарда, указаны условия, при которых вместо двух (как при (100)-каналировании) существуют три типа решений уравнения движения.

Далее на основе полученных решений уравнения движения релятивистских позитронов рассматривается формирование спектров излучения при (111)-каналировании в зависимости от типа траектории.

В § 3.2.1 исследована эволюция спектров излучения при изменении угла влета позитронов с энергией 300 МэВ в кристалл относительно (100)- и (111)-плоскостей. Исследуются усредненные по точкам влета в кристалл спектры излучения релятивистских позитронов при плоскостном каналировании в тонком кристалле. Расчеты проведены для диапазона углов влета от 0 до  $1,5\theta_c$

Сравнение спектров излучения при (111)- и (100)-каналировании релятивистских позитронов для углов влета относительно плоскостей  $\theta_0 = 0,2\theta_c$ ,  $\theta_0 = 0,7\theta_c$  приведено на рис. 7 и 8.

В § 3.2.2 исследована эволюция формы усредненных по точкам влета в кристалл спектров излучения при увеличении энергии  $e^+$  от 500 до 700 МэВ при фиксированном угле влета в кристалл.

Классификация типов движения (111) каналированных релятивистских позитронов в кристалле Si представлена в табл. 2.

Таблица 2

Тип траектории	Поперечная энергия	Период
<i>cd</i>	$0 \leq \varepsilon_{\perp} \leq U_0$	$T_{cd}$
<i>cu</i>	$U_1 \leq \varepsilon_{\perp} \leq U_0$	$T_{cu}$
<i>nc</i>	$U_0 \leq \varepsilon_{\perp}$	$T_{nc}$

В § 3.3 проведено сравнение спектров излучения каналированных электронов и позитронов. Рассматривается эволюция спектрального диапазона излучения (область главного спектрального максимума) при увеличении энергии релятивистских электронов и позитронов 100 – 800 МэВ при плоскостном каналировании в кристалле Si. Также приведены расчеты полной интенсивности излучения  $Y$ , показывающие динамику  $Y$  для отдельных групп частиц по поперечной энергии.

В § 3.4 проводится сравнение экспериментальных данных [7] по спектрам излучения 900 МэВ электронов в кристалле Si с рассчитанными нами спектрами интенсивностей излучения при (111) плоскостном каналировании электронов.

В четвертой главе рассматриваются вопросы, связанные с излучением релятивистских электронов и позитронов при каналировании вдоль (111)-плоскостей в ионном кри-

сталле LiF. Особенность задачи – в специфичном асимметричном потенциале на интервале периодичности.

В § 4.1 для характерных поперечных энергий моделируются траектории релятивистских электронов и позитронов при (111) – каналировании в кристалле LiF. Исследуется особенности спектра излучения для отдельных траекторий в зависимости от значения поперечной энергии.

В § 4.2.1 и § 4.2.2, как и в главе 3, исследуется эволюция усредненных по точкам влета спектров излучения релятивистских  $\gamma = 2000$  электронов и позитронов при различных углах падения к (111)-плоскостям каналирования кристалла LiF. При угле падения  $\theta_0 = 0$  все частицы попадают в канал и спектр представляет собой сумму вкладов групп частиц *cu* и *cd* по поперечной энергии (рис. 9).

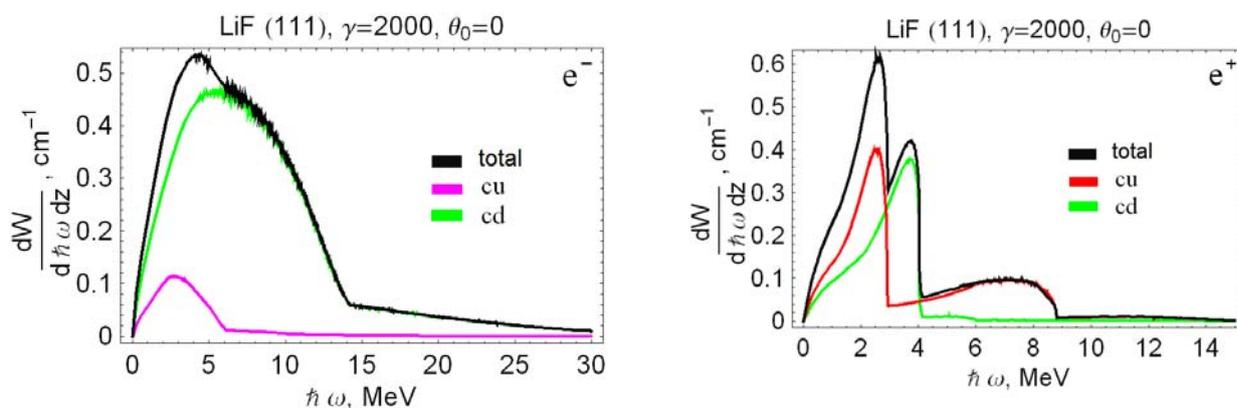


Рис. 9. Спектр излучения при (111)-каналировании релятивистских ( $\gamma = 2000$ ) электронов (справа) и позитронов (слева) в кристалле LiF.

§ 4.3 для значений релятивистского фактора в диапазоне  $\gamma = 107 \div 1000$  проводится сравнительный анализ формы спектров излучения каналированных электронов в тонком кристалле LiF, рассчитанных методами классической и квантовой электродинамики.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

### 3. Основные результаты и выводы

1. Разработан и реализован в виде пакета программ на языке аналитического программирования Mathematica 6.01 метод численного построения траекторий релятивистских электронов и позитронов при (111)-плоскостном каналировании в кристаллах со сложным базисом.

2. Исследовано формирование спектральной интенсивности излучения для так называемых двойных плоскостей ((111)-каналирование) в кристалле кремния. Показано, что в отличие от (100)-каналирования при (111)-каналировании вместо двух существует три группы частиц по поперечным энергиям, в результате вместо двух типов решений уравнения движения возникают три. Установлено, что в зависимости от соотношения между углом влета релятивистских электронов и

позитронов к (111)-плоскостям каналирования, углом Линдхарда и введенной новой величиной–субкритическим углом, форма спектра излучения будет содержать от одного до трех резко выраженных максимумов.

3. Впервые численными расчетами детально исследовано влияние «хвостов» траекторий релятивистских электронов и позитронов на форму спектра излучения при (100)- и (111)-каналировании в тонких кристаллах. Показано, что при фиксированной толщине кристаллической мишени 10 мкм и энергии частиц 2000 МэВ относительный вклад «хвостов» траекторий в спектр излучения при (100)-каналировании в кристалле Si вблизи основного максимума составляет 15% и 40%, а интегральный – 14.3% и 26.1% для электронов и позитронов соответственно.

4. Исследованы особенности спектральной интенсивности излучения каналированных электронов и позитронов вдоль (111)-плоскостей в ионном кристалле LiF, методами как классической, так и квантовой электродинамики. Показано, что даже при достаточно высоких энергиях электронов – вплоть до значений релятивистского фактора  $\gamma = 1000$  – задача все еще остается квантовой.

#### 4 Список использованной литературы

1. Байер В.Н., Катков В.М., Страховенко В.М. Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах. Новосибирск: Наука, 1989. – 400 с.
2. Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф. Электродинамика высоких энергий в веществе. М.: Наука, 1993. – 344 с.
3. Кумахов М.А. Излучение каналированных электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 160 с.
4. Базылев В. А., Жеваго Н. К. Излучение быстрых частиц в веществе и сильных полях. М.: Наука, 1987. – 272 с.
5. Теория излучения релятивистских частиц: Под ред. В.А. Бордовицина. – М.: Физматлит, 2002. – 576 с.
6. Chouffani Kh. Ph. D Thesis. The Catholic University of America. Washington D.C. 1995. – P. 173
7. Адищев Ю.Н. Рентгеновское и гамма-излучение ультрарелятивистских электронов в кристаллах: Дис. ... док. физ.-мат. наук. – М., 2004. – 223 с.

## 5 Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Bogdanov O.V.**, Pivovarov Yu.L. Formation of spectral characteristics of channeling radiation from 800 – 2000 MeV electrons and positrons in the thin silicon crystal // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B*. – 2008. – V. 266.– P. 3852-3857.
2. **Bogdanov O.V.**, Korotchenko K.B., Pivovarov Yu.L. Peculiarities of channeling radiation spectra from 100 to 800 MeV electrons and positrons in (111) Si crystal // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. –2008 – V. 41. 055004 – P. 1–8.
3. **Богданов О.В.**, Коротченко К.Б., Пивоваров Ю.Л. Эволюция спектров излучения релятивистских позитронов при (100)- и (111)-каналировании в Si с изменением угла и энергии частиц // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 311, № 2. – С. 62–65.
4. **Богданов О.В.**, Коротченко К.Б., Пивоваров Ю.Л., Тухфатуллин Т.А. Рентгеновское и гамма-излучение релятивистских электронов при каналировании в кристалле LiF: переход от квантового к классическому описанию // *Известия ВУЗов. Физика*. – 2007. – Т. 50, № 10/2. – С. 132-139.
5. **Bogdanov O.V.**, Korotchenko K.B., Pivovarov Yu.L., Tukhfatullin T.A. Channeling radiation from relativistic electrons in a thin LiF crystal: when is a classical description valid? // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B*. – 2008. – V. 266. – P. 3858-3862.
6. **Богданов О.В.**, Коротченко К.Б., Пивоваров Ю.Л. Угловое распределение дифрагированного рентгеновского излучения при (111) каналировании электронов в Si: влияние зонной структуры энергетических уровней // *Письма в ЖЭТФ*. – 2007. – Т. 85, вып. 11. – С. 684-688
7. Babaev A.A., **Bogdanov O.V.**, Efremov V.I., Korotchenko K.B., Kunashenko Yu.P., Pivovarov Yu.L., Dabagov S.B. On crystal-assisted processes by means of 20–800 MeV  $e^-/e^+$  LNF beams // *Preprint LNF*. – 2008, – LNF - 08 / 20(P).– P. 1-42.