

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Б.И. СТЕПАНОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»**

На правах рукописи

УДК 535.32, 535.42, 537.87, 539.1.03

**ГУРНЕВИЧ**  
Евгений Александрович

**ГЕНЕРАЦИЯ ФОТОНОВ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ  
ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ В КРИСТАЛЛАХ,  
ОБРАЗОВАННЫХ АНИЗОТРОПНО  
РАССЕИВАЮЩИМИ ЦЕНТРАМИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Минск 2019

Работа выполнена в НИУ “Институт ядерных проблем” Белорусского государственного университета

Научный руководитель: **Барышевский Владимир Григорьевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник лаборатории сильно-  
точной электроники НИУ “Институт ядерных про-  
блем” Белорусского государственного университе-  
та

Официальные оппоненты: **Феранчук Илья Давыдович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры теоретической физики и ас-  
трофизики физического факультета Белорусского  
государственного университета

**Шёлковый Дмитрий Викторович**,  
кандидат физико-математических наук,  
заместитель заведующего Центром фундамен-  
тальных взаимодействий и астрофизики Институ-  
та физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси

Оппонирующая организация: УО “Гомельский государственный университет  
им. Ф.Скарины”

Защита состоится 15 марта 2019 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании совета по за-  
щите диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики им. Б. И. Степано-  
ва НАН Беларуси по адресу: 220072, Минск, пр. Независимости, 68-2, тел.  
+375 17 2841559, e-mail: vyblyi@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке име-  
ни Я. Коласа Национальной академии наук Беларуси

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций, кандидат  
физико-математических наук

Выблый Ю.П.

## ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные процессы, возбуждаемые в кристаллах частицами высоких энергий, являются предметом интенсивных исследований не один десяток лет. Однако интерес к данным явлениям не снижается. В ведущих лабораториях мира создаются мощные ускорительные комплексы, предназначенные для исследований электромагнитного излучения, возникающего при взаимодействии релятивистских пучков заряженных частиц с различными мишенями, в том числе с кристаллами и искусственными пространственно-периодическими средами. Генерируемое излучение может использоваться как в исследовательских целях, так и для нужд народного хозяйства: в медицине, в системах безопасности, для контроля качества продукции и т.д.

Известно несколько типов излучения, образуемого частицей, движущейся в кристалле с постоянной скоростью: резонансное или дифракционное излучение, эффект Вавилова-Черенкова, параметрическое рентгеновское излучение, переходное излучение. Необходимость разработки источников для работы в различных спектральных диапазонах приводит к тому, что все большее внимание уделяется исследованию этих явлений не в обычных кристаллах, а в искусственных пространственно-периодических структурах, иногда называемых фотонными кристаллами. В частности, в последнее время активно проводятся теоретические и экспериментальные работы по исследованию излучения заряженных частиц в фотонных кристаллах, образованных параллельными металлическими нитями (рисунок 1). В Институте ядерных проблем Белорусского государственного университета в 2000-х годах впервые были созданы генераторы электромагнитного излучения на основе таких кристаллов, работающие в микроволновом диапазоне [6,8,9]; исследования в этой перспективной области продолжаются сейчас во многих лабораториях мира.

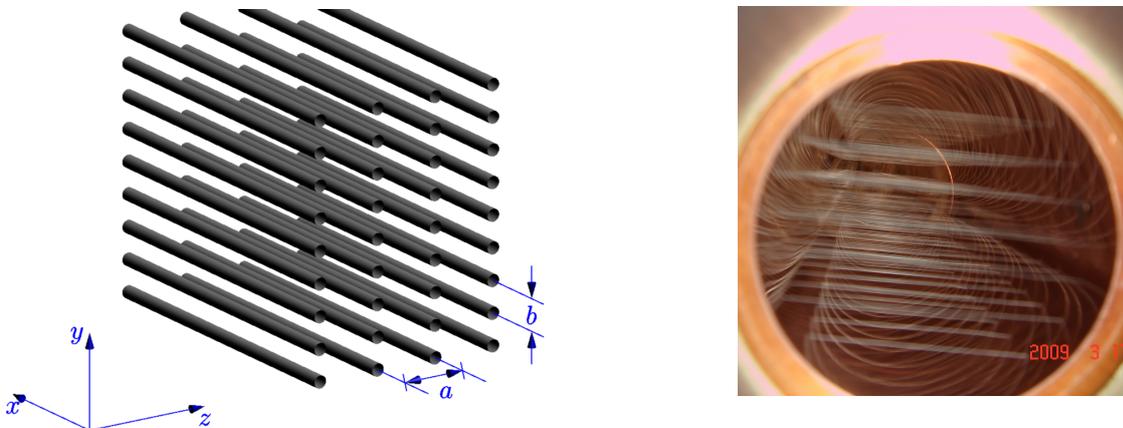


Рисунок 1. – Фотонные кристаллы, образованные параллельными металлическими нитями: схематическое изображение и фотография кристалла, расположенного внутри волновода

Проведение экспериментальных исследовательских работ высокого уровня и, тем более, создание генераторов для практических нужд требуют хорошей теоретической поддержки. Напомним, что теоретическое описание процессов излучения рентгеновских квантов в естественных кристаллах основано на динамической теории дифракции. Исходным пунктом при этом обычно является решение задачи рассеяния волны на отдельном составляющем кристалл центре (атоме). В литературе наиболее полно рассмотрен случай, когда рассеяние на отдельных центрах можно считать изотропным либо имеющим анизотропию, характерную для дипольного излучения (например, при рассеянии рентгеновских лучей на атомах). Между тем рассеяние электромагнитных волн на макроскопических элементах, из которых состоят фотонные кристаллы, далеко не всегда может быть описано аналогичным образом. Более того, анализ параметрического излучения в кристаллах из металлических нитей, проведенный в работе [V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich. Quasi-Cherenkov parametric radiation from relativistic particles passing through a photonic crystal // Nucl. Instr. Meth. B. –2015. – Vol. 355. – P. 69–75.], показал, что в случае, когда длина волны излучения становится сравнима с радиусом нити, т.е. как раз когда рассеяние на отдельной нити нельзя считать изотропным, следует ожидать существенного увеличения интенсивности излучения. Таким образом, проведение более детального теоретического анализа процессов дифракции и излучения в кристаллах, образованных анизотропно рассеивающими центрами приобретает особую актуальность.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами, темами**

Исследования, результаты которых вошли в диссертацию, проводились в Научно-исследовательском учреждении “Институт ядерных проблем” Белорусского Государственного Университета в рамках следующих программ:

- ГПФИ “Поля и частицы”, № гос. рег. 20062608, 2006–2010 гг.
- ГПОФИ ”Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии”, задание 3.31, № гос. рег. 20066745, 2006–2010 гг.
- ГПНИ “Конвергенция”, подпрограмма “Физика фундаментальных взаимодействий и плазма”, задание 2.3.02, № гос. рег. 20111382, 2011–2013 гг.
- ГПНИ “Конвергенция”, подпрограмма “Физика фундаментальных взаимодействий и плазма”, задание 2.3.05, № гос. рег. 20140532, 2014–2015 гг.
- ГПНИ “Конвергенция 2020”, подпрограмма “Микромир, плазма, Вселенная”, задание 2.3.03, № гос. рег. 20162275, 2016–2020 гг.

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований, в частности, пункту 12.2. “Физика фундаментальных взаимодействий, высоких энергий и экстремальных состояний вещества, плазма и ее применение, плазменно-пучковые технологии” перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585, а также пункту 12 (“Междисциплинарные исследования”) перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016 – 2020 годы, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190. Диссертация соответствует пункту 8 “Прохождение частиц и ядер через вещество. Ядерная оптика” паспорта специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

### Цель и задачи исследования

**Цель диссертационной работы.** Целью диссертационной работы является теоретическое описание процессов излучения фотонов релятивистскими заряженными частицами в кристаллах, образованных анизотропно рассеивающими центрами.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие **основные задачи**:

1. Разработать теоретическое описание процессов преломления и дифракции волн в трехмерных и двумерных кристаллах, образованных анизотропно рассеивающими центрами.
2. Применить разработанную теорию для исследования преломления и дифракции электромагнитных волн в фотонном кристалле, образованном параллельными металлическими нитями, и рассмотреть влияние анизотропии рассеяния на отдельной нити на процесс спонтанного излучения фотонов при движении релятивистских заряженных частиц через такие кристаллы, для случая, когда длина волны излучения  $\lambda$  много больше радиуса нитей  $R$  ( $kR \ll 1$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ ).
3. Получить выражения для спектрально-углового распределения излучения, справедливые в случае, когда длина волны сравнима с радиусом нити ( $0 < kR \lesssim 1$ ). Исследовать с их помощью спонтанное параметрическое, черенковское и переходное излучение в кристаллах, образованных металлическими нитями, при различных  $kR$ .
4. Провести анализ радиационной неустойчивости релятивистского электронного пучка и возникающего при этом индуцированного излучения в кри-

сталле из металлических нитей, размещенном внутри волновода круглого сечения.

**Объектом исследования** являются естественные и искусственные кристаллы, образованные анизотропно рассеивающими центрами.

**Предметом исследования** выступают процессы преломления и дифракции в кристаллах, образованных анизотропно рассеивающими центрами, а также свойства спонтанного и индуцированного излучения, возникающего при движении релятивистских заряженных частиц в двумерных фотонных кристаллах (в частности, образованных металлическими нитями).

### **Научная новизна**

Все основные результаты, представленные в диссертации, получены впервые. Научная новизна диссертации состоит в разработке теоретического описания процессов преломления и дифракции волн, а также процессов излучения фотонов релятивистскими заряженными частицами в кристаллах, образованных анизотропно рассеивающими центрами. Установлено, что при описании распространения волн в кристаллах, образованных анизотропно рассеивающими центрами, так же как и для изотропного случая, вместо элементов матрицы рассеяния **T** необходимо использовать элементы матрицы реакций **K**; получены явные выражения для эффективных поляризуемостей и показателя преломления таких кристаллов; получены формулы, позволяющие определить интенсивность излучения фотонов релятивистскими заряженными частицами, движущимися через двумерные кристаллы, образованные анизотропно рассеивающими центрами; показана возможность черенковского излучения в кристалле, образованном параллельными металлическими нитями; рассчитана интенсивность излучения в терагерцовом и оптическом диапазонах при типичных параметрах современных ускорителей. Представленные результаты актуальны в связи с активными исследованиями в области создания мощных источников излучения в различных частотных диапазонах, проводимыми в ведущих лабораториях мира.

### **Выносимые на защиту положения**

1. Показатель преломления и эффективные поляризуемости кристаллов, образованных анизотропно рассеивающими центрами, так же как в изотропном случае, определяются элементами матрицы реакций **K**, а не матрицы рассеяния **T**, как это имеет место для хаотической среды.

2. В фотонном кристалле, образованном параллельными металлическими нитями, возможно черенковское излучение, поскольку действительная часть показателя преломления такого кристалла для ТЕ-поляризованной волны превышает единицу, а поглощение в кристалле существенно подавлено по сравнению со случаем среды, образованной хаотически расположенными нитями.

3. Вклады ТЕ- и ТМ-поляризованной компонент в интенсивность спонтанного излучения релятивистских заряженных частиц в фотонном кристалле, образованном металлическими нитями, при  $kR \sim 1$ , где  $R$  – радиус нити,  $k$  – волновое число, являются сравнимыми, в отличие от случая  $kR \ll 1$ , когда одна компонента является доминирующей.

4. Увеличение тока электронного пучка, проходящего через расположенный внутри круглого волновода фотонный кристалл, приводит к тому, что положение максимума инкремента радиационной неустойчивости смещается от точки вырождения корней дисперсионного уравнения вниз по частоте.

### **Личный вклад соискателя**

Диссертационная работа отражает личный вклад автора в проведенные исследования. Все основные результаты, представленные в работе, получены автором самостоятельно. Научным руководителем, доктором физ.-мат. наук, профессором В.Г. Барышевским была определена область исследований, осуществлялось общее руководство, оказывалась методологическая помощь, проводились обсуждение и интерпретация полученных результатов.

В работе [2] А.А. Гуринович и А.С. Лобко участвовали в обсуждении и интерпретации полученных автором результатов.

Основные идеи экспериментальных работ [6, 8, 9] были сформулированы В.Г. Барышевским и А.А. Гуринович, остальные соавторы участвовали в подготовке и проведении экспериментов. Автором диссертации был проведен численный расчет и анализ свойств фотонных кристаллов для данных работ; автор также непосредственно участвовал в проведении экспериментов, обработке и анализе их результатов.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные результаты были представлены на следующих международных конференциях:

1. “Days on Diffraction’09”, Санкт-Петербург, Россия, 26–29 мая 2009.

2. “Seventh International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves” (MSMW’10), Харьков, Украина, 21–26 июня 2010.
3. “Современные проблемы физики-2010”, Минск, Беларусь, 9–11 июня 2010.
4. “XVIII International Seminar Nonlinear Phenomena in Complex Systems” (NPCS’11), Минск, Беларусь, 17–20 мая 2011.
5. “Fundamental and Applied NanoElectroMagnetics” (FANEM’12), Минск, Беларусь, 22–25 мая 2012.
6. “Современные проблемы физики-2014”, Минск, Беларусь, 11–13 июня 2014.
7. “XXII International Seminar Nonlinear Phenomena in Complex Systems” (NPCS’15), Минск, Беларусь, 19–22 мая 2015.
8. “Fundamental and Applied NanoElectroMagnetics” (FANEM’15), Минск, Беларусь, 25–27 мая 2015.
9. “XXIII International Seminar Nonlinear Phenomena in Complex Systems” (NPCS’16), Минск, Беларусь, 24–27 мая 2016.
10. “7th International Conference Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena” (Channeling 2016), Сирмионе-Дезенцано дель Гарда, Италия, 25–30 сентября 2016.
11. “XXIV International Seminar Nonlinear Phenomena in Complex Systems” (NPCS’17), Минск, Беларусь, 16–19 мая 2017.

### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 22 научных работах, из которых 5 — статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь (общим объемом 3.1 авторских листа), 8 — статьи в сборниках материалов конференций, 5 — тезисы докладов конференций, 4 — препринты.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объём диссертации составляет 144 страницы; работа содержит 47 рисунков на 43 страницах и 2 таблицы на 2 страницах. Библиографический список состоит из 168 наименований, включая собственные публикации автора.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В **первой главе** приводится обзор литературы по теме диссертации и краткое описание исследуемых явлений и используемых методов. Обосновывается актуальность выбранного направления исследований, связанная с многочисленными исследованиями фотонных кристаллов, в том числе двумерных фотонных кристаллов, образованных параллельными металлическими нитями, и с возможностью их применения для создания генераторов электромагнитного излучения в различных диапазонах частот, от микроволнового до ТГц и оптического.

Во **второй главе** развивается теория преломления и дифракции скалярных волн в трехмерных кристаллах. Известно, что для среды, состоящей из хаотически расположенных рассеивающих центров показатель преломления  $n$  определяется амплитудой рассеяния вперед на отдельном центре:  $n^2 = 1 + \frac{4\pi\rho_{sc}}{k^2}f(0)$ , где  $\rho_{sc}$  – число рассеивателей в единице объема,  $k$  – волновое число,  $f(\theta)$  – амплитуда рассеяния. Поскольку амплитуда рассеяния есть величина комплексная, то  $n$  даже в случае упругого рассеяния на отдельном центре имеет мнимую часть, определяющую затухание волны в среде. С другой стороны, известно, что для кристалла существенное влияние на величину показателя преломления оказывает многократное перерассеяние (дифракция) исходной волны на составляющих кристалл центрах. В частности, если рассеяние на центре можно считать изотропным, то  $n$  определяется следующей формулой:  $n^2 = 1 + \frac{4\pi}{k^2\Omega_3} \frac{f}{1 + ikf}$ , где  $\Omega_3$  – объем элементарной ячейки кристалла. С помощью оптической теоремы можно показать, что вторая формула отличается от первой величиной мнимой части  $n$ . В частности, если рассеяние на отдельных центрах является упругим, вторая формула приводит к физически правильному результату: мнимая часть показателя преломления такого кристалла оказывается тождественно равной нулю.

Для обобщения формулы для показателя преломления на случай анизотропного рассеяния в главе используется метод парциальных волн (рассеянная каждым центром волна представляется в виде суммы сферических волн с определенным моментом количества движения). Учет многократного перерассеяния волн на составляющих кристалл центрах приводит к достаточно громоздкому дисперсионному уравнению для нахождения  $n$ . В главе получено явное решение этого уравнения, имеющее следующий вид [3, 11, 21]

$$n^2 = 1 - \frac{4\pi^2}{k^3\Omega_3} \sum_l (2l + 1) K_l, \quad (1)$$

где  $K_l$  – диагональные элементы эрмитовой матрицы *реакций*  $\mathbf{K}$  (соответ-

ствующий оператор  $\hat{K}$  был введен в ядерной физике Гайтлером, и связан с обычным оператором рассеяния  $\hat{T}$  уравнениями Гайтлера; при упругом рассеянии в представлении моментов  $T_l = K_l - i\pi T_l K_l$ ). Для хаотической среды аналогично получается

$$n^2 = 1 + \frac{4\pi\rho_{sc}}{k^2} f(0) = 1 - \frac{4\pi^2\rho_{sc}}{k^3} \sum_l (2l+1)T_l. \quad (2)$$

Выражение (1), определяющее показатель преломления кристалла, отличается от (2) тем, что вместо диагональных элементов матрицы рассеяния  $T_l$  туда входят диагональные элементы эрмитовой матрицы реакций  $K_l$ . Принципиальная разница между (2) и (1) заключается в том, что в случае наличия только упругого канала рассеяния на отдельном центре выражение (1) действительно, тогда как (2) имеет и действительную, и мнимую часть (волна в среде затухает). Таким образом, если в хаотической среде в ослабление волны дают вклад как процессы неупругого рассеяния на отдельных центрах, так и чисто упругие процессы, то в кристалле ослабление волны может быть обусловлено только процессами неупругого рассеяния (поглощения) на составляющих кристалл центрах.

Дальнейший проведенный анализ показал, что для описания дифракции в кристалле справедлива обычная система динамических уравнений

$$\left(1 - \frac{k^2}{k_0^2}\right) \varphi(\mathbf{k}) + \sum_{\boldsymbol{\tau}} g_{\boldsymbol{\tau}} \varphi(\mathbf{k} - \boldsymbol{\tau}) = 0, \quad (3)$$

$$\Psi(\mathbf{r}) = \sum_{\boldsymbol{\tau}} \varphi(\mathbf{k} + \boldsymbol{\tau}) e^{i(\mathbf{k} + \boldsymbol{\tau})\mathbf{r}}, \quad (4)$$

где  $\boldsymbol{\tau}$  – вектор обратной решётки кристалла, а эффективные поляризуемости кристалла  $g_{\boldsymbol{\tau}}$  также должны выражаться через элементы матрицы реакций  $K_l$  [3, 11, 21]:

$$g_{\boldsymbol{\tau}} = -\frac{4\pi^2}{k_0^3\Omega_3} \sum_l (2l+1)K_l P_l(\cos(\mathbf{k}, \mathbf{k} + \boldsymbol{\tau})). \quad (5)$$

**Третья глава** посвящена развитию теории преломления и дифракции электромагнитных волн в двумерно-периодических фотонных кристаллах, образованных параллельными нитями (под нитью понимается круговой цилиндр с радиусом, много меньшим длины).

Приведены явные выражения для амплитуды рассеяния ТЕ- и ТМ-поляризованных волн (напряженность электрического, или, соответственно, магнитного поля которых перпендикулярна оси нити) на нитях с диэлектрической и магнитной проницаемостями  $\varepsilon$  и  $\mu$ . Показано, что для ТЕ-

поляризованной волны рассеяние на нити всегда является анизотропным, даже в длинноволновом пределе, когда длина волны много больше радиуса нити  $R$  ( $k_\rho R \ll 1$ , где  $k_\rho = \sqrt{k^2 - k_x^2}$ ,  $k_x$  - составляющая волнового вектора вдоль оси нити). Для ТМ-поляризации рассеяние изотропно только при  $k_\rho R \ll 1$ . Показано, что для нитей из любого материала при изменении  $k_\rho R$  в диапазоне от 0 до 1 можно ограничиться учетом влияния только первого анизотропного члена (пропорционального косинусу угла рассеяния), и использовать следующее выражение для волны, рассеянной одиночной нитью:

$$\Psi = e^{i\mathbf{k}_\rho \boldsymbol{\rho}} + e^{i\mathbf{k}_\rho \boldsymbol{\rho}_1} \cdot i\pi \tilde{f}_0 H_0(k_\rho |\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}_1|) - e^{i\mathbf{k}_\rho \boldsymbol{\rho}_1} \cdot \pi \tilde{f}_1 H_1(k_\rho |\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}_1|) \cos(\mathbf{k}_\rho, \boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}_1), \quad (6)$$

где  $\boldsymbol{\rho}_1 = (y_1, z_1)$  - координаты нити,  $\boldsymbol{\rho} = (y, z)$ ,  $H_{0,1}$  - функции Ганкеля 1-го рода, ось нити параллельна оси  $x$ ,  $\tilde{f}_0, \tilde{f}_1$  - безразмерные парциальные амплитуды рассеяния.

Далее рассмотрено рассеяние плоской волны на одномерной решетке (кристаллической плоскости), образованной периодически расположенными параллельными нитями. Найдены явные выражения для эффективных амплитуд рассеяния волны нитью (учитывающие многократное перерассеяние волн на составляющих решетку нитях). Получено явное выражение для показателя преломления  $n$  кристалла, образованного параллельными нитями, справедливое при  $|n^2 - 1| \ll 1$ ,  $|\pi \tilde{f}(\varphi)| \ll 1$  [3]:

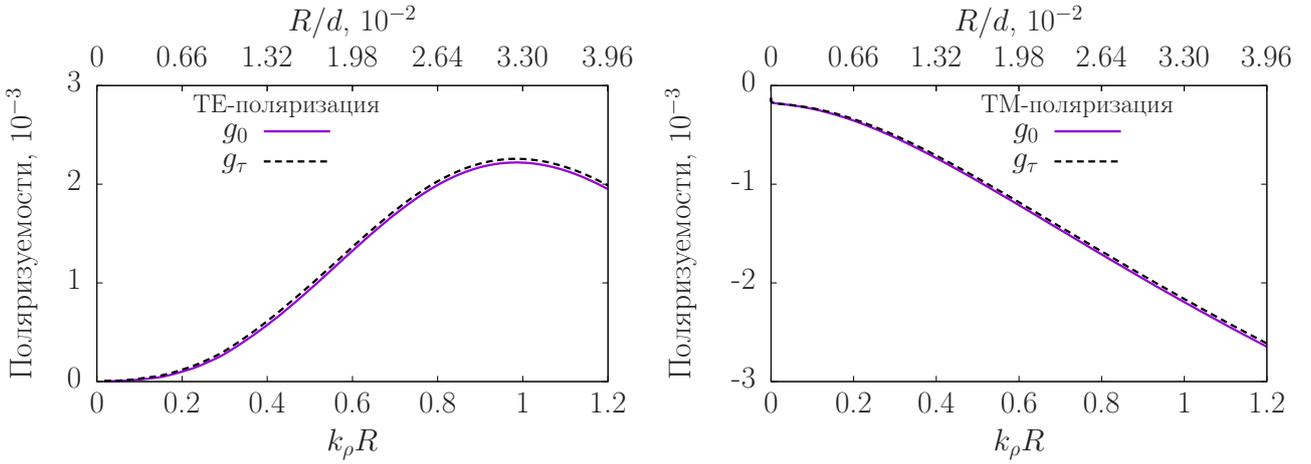
$$n^2 \simeq 1 + \frac{4\pi}{k^2 \Omega_2} \cdot \left\{ \frac{\tilde{f}_0}{1 + i\pi \tilde{f}_0} + \frac{\tilde{f}_1}{1 + i\frac{\pi}{2} \tilde{f}_1} \right\}, \quad (7)$$

где  $\Omega_2$  - площадь элементарной ячейки кристалла.

Последний раздел главы 3 посвящен детальному исследованию дифракции и преломления в кристалле. Вначале для примера рассмотрено рассеяние волны на двух одномерных решетках из нитей. Затем получено дисперсионное уравнение, позволяющее рассчитать возможные значения волнового вектора в кристалле из нитей при любых (а не только малых) значениях амплитуд рассеяния  $\tilde{f}_0, \tilde{f}_1$ . Показано, что при  $|\pi \tilde{f}_0|, |\pi \tilde{f}_1| \ll 1$  эффективные поляризуемости кристалла имеют вид [3]

$$g_\tau = \frac{4\pi}{k^2 \Omega_2} \left( \frac{\tilde{f}_0}{1 + i\pi \tilde{f}_0} + \frac{\tilde{f}_1}{1 + i\frac{\pi}{2} \tilde{f}_1} \cdot \cos(\mathbf{k}, \mathbf{k} + \boldsymbol{\tau}) \right), \quad (8)$$

а показатель преломления определяется выражением (7). Рассчитаны дисперсионные кривые и зависимости эффективных поляризуемостей от  $k_\rho R$  для кристаллов, образованных металлическими нитями (рисунок 2). Впервые установлено, что действительная часть показателя преломления таких



**Рисунок 2.** – Зависимости эффективных поляризуемостей кристалла, образованного медными нитями от  $k_\rho R$ . Периоды кристалла  $a = b \equiv d$ ,  $kd \approx 34.6$  (при  $d = 2$  мм это соответствует частоте  $f \approx 0.83$  ТГц)

кристаллов для ТЕ-поляризованной волны превышает 1, а мнимая часть показателя преломления существенно подавлена, несмотря на сильное поглощение фотонов в металле. Таким образом, рассматриваемые кристаллы ведут себя по отношению к электромагнитным волнам как прозрачная среда, в которой оказывается возможным черенковское излучение [1, 3, 10]. Кроме того, показано, что эффективные поляризуемости кристаллов из металлических нитей для ТЕ-поляризованной волны имеют максимум при  $k_\rho R \sim 1$ , и с помощью полученного дисперсионного уравнения для конкретных примеров рассчитана величина поляризуемостей в этой области [5].

Установленная в главе 3 возможность черенковского излучения в кристаллах, образованных металлическими нитями, подробно рассматривается **в четвертой главе**. Здесь проводится исследование спонтанного черенковского, а также переходного и параметрического излучения в таких кристаллах с точки зрения его возможного экспериментального наблюдения и практического использования. В разделе 4.1 рассмотрено черенковское излучение для случая, когда длина волны излучения много больше радиуса нити ( $kR \ll 1$ ). Приведены результаты расчетов показателя преломления кристалла для волн с различной поляризацией в соответствии с полученными в предыдущей главе формулами. Показано, что для ТЕ-волны при  $kR \ll 1$  в случае идеально проводящих нитей  $n_\perp^2 \approx 1 + \frac{\pi R^2}{\Omega_2}$ , а для нитей с конечной проводимостью  $\sigma$

$$n_\perp^2 \approx 1 + \frac{2\pi R^2}{\Omega_2} + i \frac{\pi R^2}{\Omega_2} \left( \frac{\pi \sigma R}{2c} + \frac{c}{\pi \sigma R} \right) (kR), \quad (9)$$

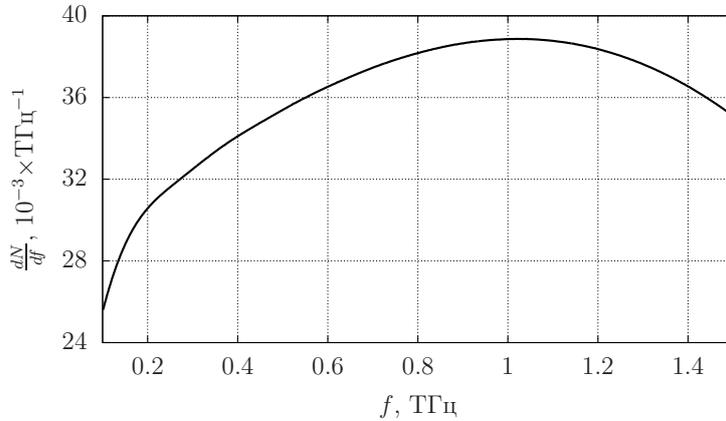
т.е. показатель преломления превышает единицу (результат получен впервые в работе [1]). Из полученных выражений видно, что учет конечной проводи-

мости нитей может быть очень важен при малых  $kR$ ; в частности, предельное (при  $kR \rightarrow 0$ ) значение эффективной диэлектрической восприимчивости кристалла  $g_0 = n^2 - 1$  при учете их конечной проводимости оказывается приблизительно в два раза больше, чем предсказывает модель идеально проводящих нитей. Аналогично, для ТМ-волны в случае идеально проводящих нитей  $n_{\parallel}^2 = 1 - \frac{k_p^2}{k^2}$ , где  $k_p$  определяется соотношением радиуса нити и периодов кристалла, а в случае нитей с конечной проводимостью

$$n_{\parallel}^2 \approx 1 - \frac{2\pi R^2}{\Omega_2} \left( \frac{2\pi\sigma R}{c} \right)^2 \left( \ln \frac{d}{2\pi R} + \frac{\pi}{4} \right) + i \frac{4\pi\sigma \pi R^2}{kc \Omega_2}, \quad (10)$$

где  $a = b \equiv d$  – периоды кристалла.

Расчет интенсивности излучения в разделе 4.1 проведен с использованием классических формул для спектрально-углового распределения черенковского излучения и полученных выше значений показателя преломления кристалла. На рисунке 3 показана рассчитанная интенсивность черенковского излучения релятивистского электрона в кристалле из медных нитей со следующими параметрами: периоды  $a = b = 100$  мкм, радиус нитей  $R = 15$  мкм, толщина кристалла 10 см, Лоренц-фактор электрона  $\gamma = 5$ . Из приведенного

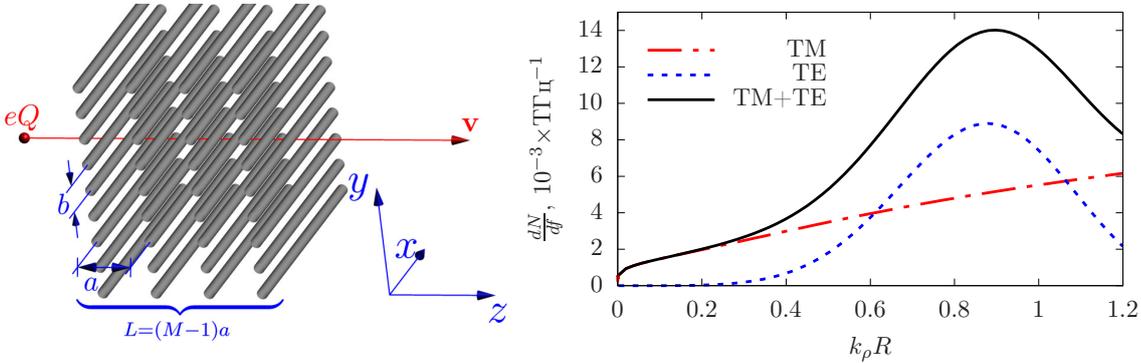


**Рисунок 3. – Интенсивность черенковского излучения в фотонном кристалле, образованном металлическими нитями**

на рисунке 3 графика следует, что, к примеру, в диапазоне частот  $95 \div 105$  ТГц ( $\Delta f/f \approx 0.1$  при  $f = 100$  ТГц) электрон при пролете через кристалл излучает приблизительно  $N \sim 2.6 \cdot 10^{-4}$  фотонов. Аналогично, в диапазоне  $0.95 \div 1.05$  ТГц количество испущенных фотонов будет  $N \sim 3.9 \cdot 10^{-3}$ . Для частиц с большим зарядом или сгустков частиц интенсивность излучения может быть существенно выше. Уже производимые сегодня фемтосекундные сгустки электронов с зарядом порядка 1 нКл будут генерировать в рассматриваемом кристалле импульсы излучения с пиковой мощностью в десятки кВт. Использование фемтосекундных сгустков с большим (например,  $\sim 10^{13}$

для протонов) числом частиц позволит получать в рассмотренном кристалле короткие импульсы черенковского излучения с очень большой пиковой мощностью (порядка сотен ГВт; энергия в импульсе до сотен Дж).

В разделе 4.2 исследуется излучение в случае, когда длина волны сравнима с радиусом составляющих кристалл нитей ( $kR \sim 1$ ). Получены выражения для спектрально-углового распределения излучения, позволяющие проводить анализ излучения для периодических структур, состоящих из произвольного числа кристаллических плоскостей  $M$ , даже настолько малого, когда такие структуры ещё нельзя называть двумерными кристаллами (вплоть до  $M = 1$ , см. рисунок 4). С помощью полученных выражений исследована зависимость интенсивности переходного и черенковского излучения от параметра  $k_\rho R$  для кристаллических пластинок различной толщины  $L$ . В случае, когда число плоскостей  $M$  достаточно велико для того, чтобы выполнялось условие  $kL|n - 1| \gtrsim 1$ , интенсивность излучения для ТЕ-волны достигает максимума при  $k_\rho R \sim 1$ , соответствующего максимальному значению поляризуемости. На рисунке 4 приведены результаты расчета интенсивности черенковского и переходного излучения в кристалле из металлических нитей со следующими параметрами: периоды кристалла  $a = b = 0.2$  см, толщина 10 см. Лоренц-фактор электрона составлял  $\gamma = 100$ , частота излучения  $f = 0.83$  ТГц. В области максимума (при  $k_\rho R \approx 0.9$ ) полная интенсивность излучения достигает величины  $1.4 \cdot 10^{-2}$  фотонов/ТГц на частоте  $f = 0.83$  ТГц [5].



**Рисунок 4. – Интенсивность переходного и черенковского излучения в кристалле, образованном металлическими нитями, в зависимости от величины  $k_\rho R$ . Показаны интенсивность излучения ТМ- и ТЕ-поляризованной волн, а также суммарная (для обеих поляризаций) интенсивность.**

Расчет параметрического излучения в кристалле из нитей проведен с помощью известных выражений для спектрально-углового распределения, и полученных в предыдущей главе значений поляризуемостей кристалла. В главе приведены примеры для излучения в оптическом и ТГц диапазонах. Результаты расчета интенсивности излучения в направлении дифракции в геометрии Лауэ, а также угловые распределения излучения для примера в ТГц диа-

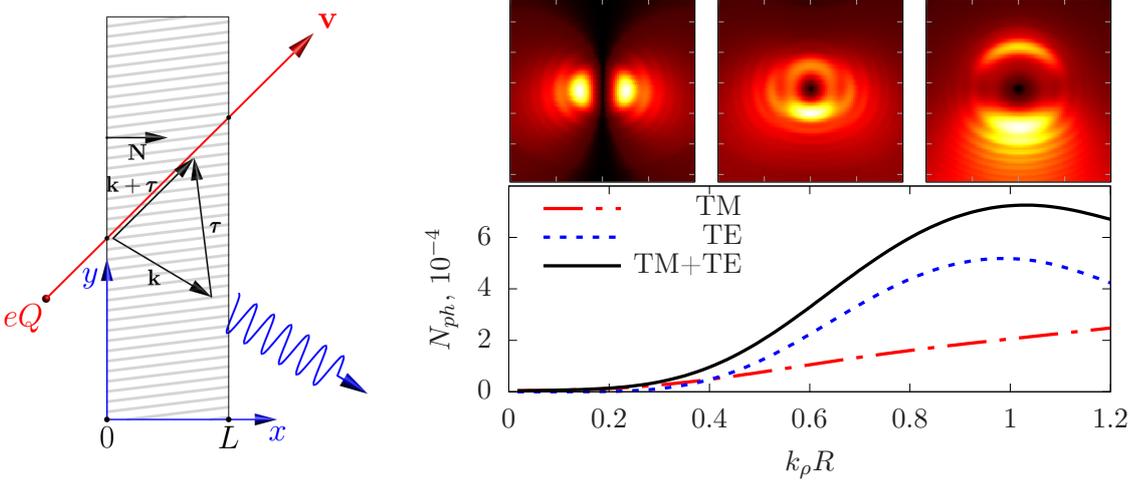


Рисунок 5. – Параметрическое излучение. Слева: геометрия задачи; справа внизу: зависимость интенсивности излучения (числа фотонов, излучаемых при пролете одного электрона через кристалл) от параметра  $k_\rho R$ ; справа вверху: изменение углового распределения излучения при увеличении  $k_\rho R$ .

пазоне приведены на рисунке 5 [5]. Периоды кристалла  $a = b = 0.2$  см, толщина  $L = 10$  см,  $\gamma = 100$ , вектор обратной решетки  $\boldsymbol{\tau} = \frac{6\pi}{a}\mathbf{e}_y$ , частота излучения  $f \approx 0.83$  ТГц. Видно, что интенсивность излучения для ТМ-поляризации с увеличением  $k_\rho R$  монотонно растёт и достигает при  $k_\rho R = 1.2$  значения  $N_{\parallel} \approx 2.5 \cdot 10^{-4}$  фотонов/электрон. При больших  $k_\rho R$  существенно возрастает также и интенсивность излучения ТЕ-поляризованной волны; в рассматриваемом случае уже при  $k_\rho R \gtrsim 0.4$  она начинает превышать интенсивность излучения для ТМ-поляризации, а при  $k_\rho R \approx 1$  достигает максимального значения  $N_{\perp} \approx 5 \cdot 10^{-4}$  фотонов/электрон. Суммарная интенсивность излучения достигает максимума также при  $k_\rho R \approx 1$ . Следует отметить, что при больших  $k_\rho R$  вклады в суммарную интенсивность ТЕ- и ТМ-поляризованной волн могут быть сравнимыми, тогда как при  $k_\rho R \ll 1$  основной вклад в интенсивность излучения получается за счет ТМ-поляризованной волны, что хорошо видно на графиках углового распределения. Проведенные в разделе 4.2.5 расчеты мощности излучения от коротких электронных сгустков показали, что пиковая мощность излучения на существующих ускорителях может составлять десятки кВт (при заряде сгустков порядка 1 нКл), а в перспективе, при увеличении числа частиц в сгустке до  $10^{10}$ – $10^{13}$ , может достигать очень больших величин от десятков МВт до сотен ГВт [5, 12, 13, 22]. Таким образом, параметрическое и черенковское излучение в кристалле из металлических нитей может представлять интерес для различных практических применений, в том числе для создания источников мощных импульсов ТГц-излучения [2].

**В пятой главе** исследуется радиационная неустойчивость электронно-

го пучка в фотонном кристалле, расположенном внутри волновода круглого сечения. Генераторы электромагнитного излучения на основе фотонных кристаллов, в том числе кристаллов, образованных металлическими нитями, впервые были созданы в Институте ядерных проблем Белорусского государственного университета в 2000-х годах [6, 8, 9]. Исследовалась генерация в микроволновом диапазоне частот, а для эффективной проводки пучка кристалл располагался внутри металлического волновода круглого сечения. В настоящее время исследования подобных генераторов проводятся во многих лабораториях мира.

В разделе 5.2 получены основные уравнения, описывающие взаимодействие электронного пучка с электромагнитным полем внутри волновода. Для анализа волновод с периодически натянутыми нитями представлялся как волновод с периодическим диэлектрическим заполнением [4]  $\varepsilon(\mathbf{r}, \omega) = \varepsilon_0(\boldsymbol{\rho}) + \chi(\mathbf{r}, \omega)$ , где  $\chi$  – периодическая по  $z$  функция (ось  $z$  совпадает с осью волновода), которая может быть разложена в ряд Фурье  $\chi(\mathbf{r}, \omega) = \sum_{\tau \neq 0} \chi_{\tau}(\boldsymbol{\rho}, \omega) e^{i\tau z}$ ,  $\boldsymbol{\rho}$  – поперечная компонента радиус-вектора, а  $\chi_{\tau}$  могут быть найдены с помощью теории, развитой в третьей главе.

Далее в главе 5 приведены подробные численные решения полученных уравнений для нескольких примеров в микроволновой и ТГц областях электромагнитного спектра. Проанализирована зависимость инкремента радиационной неустойчивости пучка от величины его тока и от частоты вблизи точки вырождения корней дисперсионного уравнения, где должна проявляться новая физическая закономерность [V.G. Baryshevsky, I.D. Feranchuk. Parametric beam instability of relativistic charged particles in a crystal // Phys. Lett. A. – 1984. – Vol. 102. – P. 141–144], в соответствии с которой инкремент неустойчивости пучка должен быть пропорционален корню четвертой степени из его плотности, а не третьей. Типичные результаты приведены на рисунках 6-7 на примерах систем, работающих в микроволновом (радиус волновода  $R = 6$  см, период  $D = 3.6$  см) и ТГц диапазонах ( $R = 10$  мм,  $D = 4$  мм). Можно видеть, что при достаточно низких токах максимальное значение инкремента имеет в точке вырождения корней дисперсионного уравнения, а при возрастании тока пучка положение максимума смещается вниз по частоте, удаляясь от точки вырождения корней (смещение показано на рисунке стрелкой) [4]. Указанное смещение необходимо учитывать при разработке генераторов и усилителей излучения, поскольку оно приводит к зависимости оптимальной (обеспечивающей наибольшее усиление) энергии пучка от его тока. В частности, в рассмотренном для ТГц диапазона примере оптимальная энергия уменьшается практически в два раза (с 50 МэВ до

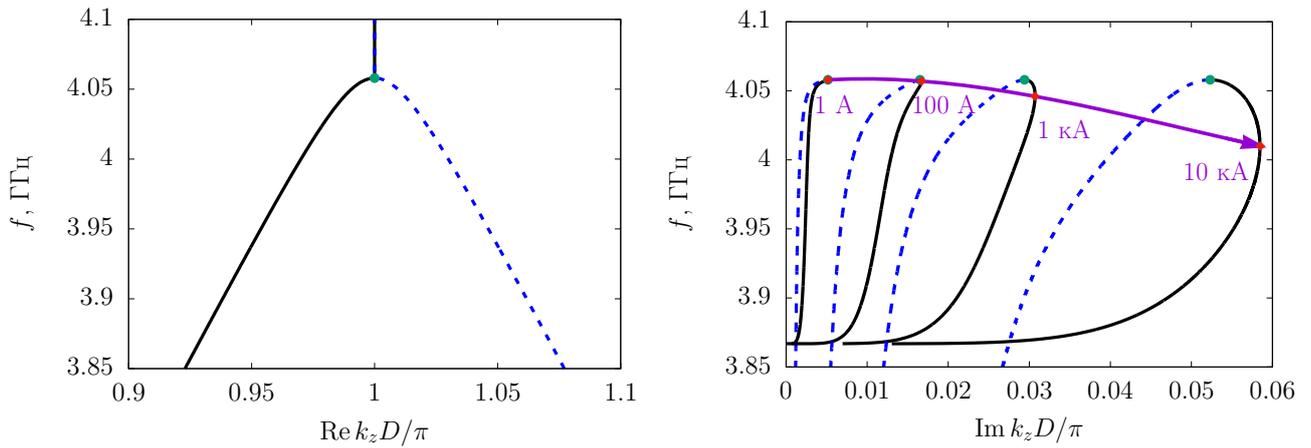


Рисунок 6. – Решения дисперсионного уравнения вблизи точки вырождения корней. Слева: связь действительной части продольного волнового числа  $k_z$  и частоты; справа: связь мнимой части  $k_z$  (инкремента неустойчивости) и частоты при разных токах пучка. Два различных корня показаны сплошной и штрихованной линиями

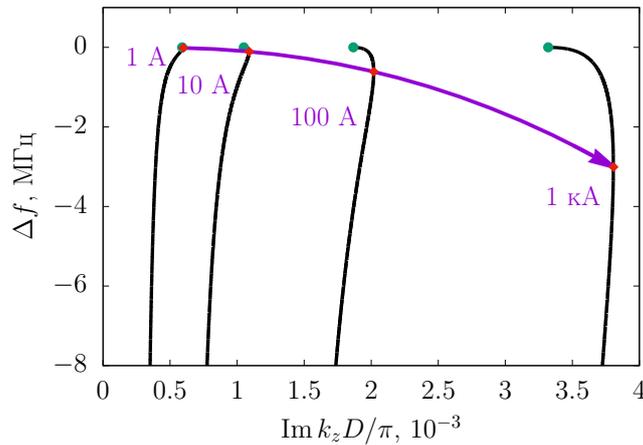


Рисунок 7. – Связь инкремента неустойчивости  $\text{Im } k_z$  и частоты при разных токах пучка. По оси ординат отложена разность  $\Delta f = f - f_0$ , где  $f_0 \approx 0.412$  ТГц (точка вырождения корней). Для того, чтобы не загромождать рисунок, на графике показан только один корень дисперсионного уравнения

25 МэВ) при увеличении тока пучка с 1 А до 1 кА.

В заключение в главе 5 приведены рассчитанные зависимости пороговых (необходимых для начала генерации) токов пучка от длины кристалла  $L$ . Показано, что, поскольку вблизи точки вырождения корней пороговая плотность тока обратно пропорциональна  $L^5$ , то для осуществления генерации могут использоваться кристаллы небольшой длины [2, 4, 18]. В рассмотренном для ТГц диапазоне примере при токе пучка порядка 10 А для начала генерации достаточно иметь структуру длиной всего несколько сантиметров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

Диссертационная работа посвящена исследованию процессов излучения электромагнитных волн релятивистскими заряженными частицами в фотонных кристаллах, образованных анизотропно рассеивающими центрами. Рассмотрены преломление и дифракция волн в таких кристаллах. Исследовано спонтанное излучение фотонов релятивистскими заряженными частицами в кристаллах, образованных параллельными металлическими нитями, а также радиационная неустойчивость релятивистского электронного пучка и индуцированное излучение в одномерном цилиндрическом фотонном кристалле. Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

- Развита теория преломления и дифракции волн в фотонных кристаллах, образованных анизотропно рассеивающими центрами, позволившая в явном виде получить выражения для показателя преломления и эффективных поляризуемостей кристалла. Показано, что, так же как и в случае изотропного рассеяния, показатель преломления кристалла определяется элементами матрицы реакций  $\mathbf{K}$ , а не элементами матрицы рассеяния  $\mathbf{T}$ , как это имеет место для хаотической среды. Элементы матрицы реакций также определяют и эффективные поляризуемости в уравнениях, описывающих динамическую дифракцию в кристаллах [3, 11, 20, 21].
- Установлено, что действительная часть показателя преломления кристалла, образованного параллельными металлическими нитями, для волны с перпендикулярной нитям поляризацией (TE-поляризация, вектор  $\mathbf{E}$  перпендикулярен осям нитей) больше единицы, а поглощение в кристалле существенно подавлено, несмотря на сильное поглощение фотонов в металле. Как следствие, в рассматриваемом кристалле возможно черенковское излучение в широком диапазоне частот, вплоть до оптических [1, 3, 7, 10, 21].
- Показано, что при типичных параметрах современных ускорителей, таких как ЛИНАК-800 в ОИЯИ (Дубна, Россия), JLab ERL в США, KEK sERL в Японии, мощность спонтанного черенковского излучения в кристалле, образованном металлическими нитями, может достигать значительных величин (например, десятки ватт средней мощности для ускорителя JLab ERL в США на частоте 0.5 ТГц), что позволяет использовать этот эффект для создания источников излучения в терагерцовом и оптическом диапазонах [1–3, 7, 10, 21].
- Получены уравнения, позволившие определить интенсивность переходного, черенковского и параметрического излучения в кристалле из металлических нитей в случае, когда длина волны сравнима с радиусом нитей ( $kR \sim 1$ ).

Численное решение полученных уравнений для выбранной геометрии кристалла позволило найти интенсивность излучения в области её максимального значения (при  $kR \sim 1$ ) [5, 12, 13, 17, 18, 22].

- Показано, что в случае  $kR \sim 1$  существенный вклад в суммарную интенсивность параметрического и черенковского излучения в кристалле из металлических нитей вносит ТЕ-поляризованная волна, тогда как в случае  $kR \ll 1$  излучение практически полностью ТМ-поляризовано. Приведены результаты расчетов углового распределения излучения [5, 12, 13, 17, 18, 22].

- Показано, что при типичных параметрах существующих и строящихся ускорителей (ЛИНАК-800 в России, JLab ERL в США, KEK sERL в Японии, ускоритель комплекса SwissFEL в Швейцарии) интенсивность излучения в области  $kR \sim 1$  достигает значительных величин. Например, для ускорителей, генерирующих короткие (длительностью в десятки и сотни фемтосекунд) электронные сгустки с числом электронов  $N_e \sim 10^9$  и высокой (десятки и сотни МГц) частотой повторения мгновенная мощность генерируемого ТГц-излучения может составлять единицы и десятки киловатт, а средняя мощность – десятки ватт. Увеличение числа частиц в сгустках до  $10^{11}$ – $10^{13}$ , возможность которого является сегодня предметом интенсивных исследований при разработке новых ускорителей электронов и релятивистских ионов (протонов), позволит получать импульсы ТГц-излучения с рекордной мгновенной мощностью в сотни гигаватт [5, 12, 13, 17, 18, 22].

- Рассмотрено индуцированное излучение релятивистского электронного пучка в кристалле из металлических нитей, расположенном внутри круглого волновода. Рассчитаны зависимости инкремента радиационной неустойчивости пучка от частоты для нескольких примеров в микроволновой и ТГц-областях электромагнитного спектра. Показано, что при увеличении тока пучка положение максимума инкремента неустойчивости смещается из точки вырождения корней дисперсионного уравнения в область более низких частот. Установлены минимальные требования к электронному пучку, необходимые для осуществления генерации в области максимума инкремента неустойчивости в микроволновом диапазоне при низких энергиях пучка (до единиц МэВ) и в ТГц-диапазоне при высоких энергиях (десятки и сотни МэВ), доступных на современных и строящихся ускорителях, таких как ЛИНАК-800 в ОИЯИ (Дубна, Россия) и т.д. В соответствии с результатами расчетов, пороговая (необходимая для начала генерации) плотность тока в рассматриваемых кристаллах имеет достаточно низкие значения и составляет десятки А/см<sup>2</sup> при толщине кристалла в несколько сантиметров [2, 4, 16, 19].

## Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты могут быть использованы при решении ряда задач, имеющих как научное, так и прикладное значение.

В частности, результаты второй и третьей глав могут представлять интерес при изучении дифракции нейтронов в фотонных кристаллах, а также при проектировании и разработке пространственно периодических метаматериалов с заданными свойствами.

Результаты, приведенные в четвертой и пятой главе, имеют значение для решения актуальной задачи создания мощных источников электромагнитного излучения в ТГц и оптическом диапазоне. В частности, на основе полученных результатов могут планироваться эксперименты по генерации импульсов терагерцового излучения электронными сгустками на ускорителях типа КЕК сERL в Японии или ЛИНАК-800 в ОИЯИ (Дубна, Россия). Кроме того, данные результаты могут использоваться при создании детекторов для регистрации заряженных частиц больших энергий.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных журналах

1. Барышевский, В.Г. О возможности черенковского излучения в фотонном кристалле, образованном параллельными металлическими нитями / В.Г. Барышевский, Е.А. Гурневич // Вестник БГУ, сер. 1. — 2009. — Т. 3. — С. 38–44.
2. Generation of medical X-ray and THz beams of radiation using table-top accelerators / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich, E.A. Gurnevich, A.S. Lobko // *Il Nuovo Cimento C*. — 2011. — Vol. 34, no. 4. — P. 199–205.
3. Baryshevsky, V.G. Dynamical diffraction theory of waves in photonic crystals built from anisotropically scattering elements / V.G. Baryshevsky, E.A. Gurnevich // *J. Nanophotonics*. — 2012. — Vol. 6, no. 1. — P. 061713.
4. Baryshevsky, V.G. The Electron Beam Instability in a One-Dimensional Cylindrical Photonic Crystal / V.G. Baryshevsky, E.A. Gurnevich // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. — 2012. — Vol. 15, no. 2. — P. 155–162.
5. Baryshevsky, V.G. Cherenkov and parametric (quasi-Cherenkov) radiation produced by a relativistic charged particle moving through a crystal built from metallic wires / V.G. Baryshevsky, E.A. Gurnevich // *Nucl. Instr. and Meth. B*. — 2017. — Vol. 402. — P. 30–34.

### Статьи в материалах конференций

6. Volume free electron laser with a “grid” photonic crystal with variable period: theory and experiment / V.G. Baryshevsky, N.A. Belous, A.A. Gurinovich, E.A. Gurnevich, V.A. Evdokimov, P.V. Molchanov // *Proc. of FEL’09 Conference, 23–28 August 2009, Liverpool*. — 2009. — P. 134–137.
7. Baryshevsky, V.G. The possibility of cherenkov radiation generation in a photonic crystal formed by parallel metallic threads / V.G. Baryshevsky, E.A. Gurnevich // *2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves*. [Electronic resource]. — 2010. — Mode of Access: <http://dx.doi.org/10.1109/MSMW.2010.5546019>. — Date of Access: 19.08.2010.
8. Experimental studies of Volume FELs with a photonic crystal / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich, N.A. Belous, E.A. Gurnevich, V.A. Evdokimov, P.V. Molchanov // *Proc. of 35th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 5–10 September 2010, Rome, Italy, We-F2.2*. [Electronic resource]. — 2010. — Mode of Access: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIMW.2010.5612862> — Date of Access: 19.08.2010.

9. Experimental Studies of Volume Fels With a Photonic Crystal Made of Foils / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich, N.A. Belous, V.A. Evdokimov, E.A. Gurnevich, P.V. Molchanov // Proc. of FEL'2010 Conference, 23–27 August 2010, Hilton Malmö City, Sweden. — 2010. — P. 632–635.

10. Барышевский, В.Г. Возможность черенковского излучения в фотонном кристалле, образованном параллельными металлическими нитями / В.Г. Барышевский, Е.А. Гурневич // Сборник научных трудов международной школы-конференции молодых учёных и специалистов “Современные проблемы физики”, Минск, 9–11 июня 2010 / Под ред. В. В. Машко, В. З. Зубелевича, А. В. Буцня. — 2010. — С. 33–38.

11. Барышевский, В.Г. Динамическая дифракция волн в трёхмерных естественных и фотонных кристаллах, образованных анизотропно рассеивающими центрами / В.Г. Барышевский, Е.А. Гурневич // Сборник научных трудов международной школы-конференции молодых учёных и специалистов “Современные проблемы физики”, Минск, 11–13 июня 2014 / Под ред. В. В. Машко, Е. В. Шабуня-Клячковской, Е. А. Сафронова. — 2014. — С. 21–26.

12. Baryshevsky, V.G. Quasi-Cherenkov radiation in a photonic crystal built from parallel metallic wires in the case of anisotropic scattering of waves by the wire / V.G. Baryshevsky, E.A. Gurnevich // Nonlinear Dynamics and Applications. Proceedings of the XXII Annual Seminar “Nonlinear Phenomena in Complex Systems” (NPCS'2015), May 19-22, 2015, Minsk, Belarus. — Vol. 21. — 2015. — P. 126–138.

13. Baryshevsky, V.G. Generation of THz radiation by femtosecond electron bunches in photonic crystals of free electron lasers / V.G. Baryshevsky, E.A. Gurnevich // Nonlinear Dynamics and Applications. Proceedings of the XXIII Annual Seminar “Nonlinear Phenomena in Complex Systems” (NPCS'2016), May 24–27, 2016, Minsk, Belarus. — Vol. 22. — 2016. P. 129–136.

### **Тезисы докладов**

14. Baryshevsky, V.G. Long-wave approximation in the theory of dynamic diffraction of waves in photonic crystals formed by metallic threads / V.G. Baryshevsky, Y.A. Hurnevich // Abstracts of International Conference Days on Diffraction'2009, St. Petersburg, May 26–29. — 2009. — P. 106.

15. Гурневич, Е.А. Возможность черенковского излучения в фотонном кристалле, образованном параллельными металлическими нитями / Е.А. Гурневич // Программа и краткие тезисы докладов международной школы-конференции молодых учёных и специалистов “Современные проблемы физики”, Минск, 9–11 июня 2010 / — 2010. — С. 6.

16. Барышевский, В. Г. Динамическая дифракция волн в трёхмерных естественных и фотонных кристаллах, образованных анизотропно рассеивающими центрами / В.Г. Барышевский, Е.А. Гурневич // Программа и краткие тезисы докладов международной школы-конференции молодых учёных и специалистов “Современные проблемы физики”, Минск, 11–13 июня 2014 / — 2014. — С. 4.

17. Baryshevsky, V.G. Cherenkov and parametric (quasi-Cherenkov) radiations produced by a relativistic charged particle moving through crystals built from metallic wires / V.G. Baryshevsky, E.A. Gurnevich // Channeling 2016 – Book of Abstracts of 7th International Conference Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena, 25–30 September 2016, Sirmione-Dezzenano del Garda, Italy. — 2016. — P. 48.

18. VFEL-based THz radiation sources with resonators formed by metallic wires / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich, E.A. Gurnevich, P.V. Molchanov // Channeling 2016 – Book of Abstracts of 7th International Conference Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena, 25–30 September 2016, Sirmione-Dezzenano del Garda, Italy. — 2016. — P. 136.

## Препринты

19. Baryshevsky, V.G.. The electron beam instability in a one-dimensional cylindrical photonic crystal / V.G. Baryshevsky, E.A. Gurnevich // [Electronic resource]. — 2011. — Mode of Access: <https://arxiv.org/abs/1105.2873>. — Date of Access: 14.05.2011.

20. Baryshevsky, V.G.. Refraction and Diffraction of Waves in Electromagnetic (Photonic) Crystals Formed by Anisotropically Scattering Elements / V.G. Baryshevsky, E.A. Gurnevich // [Electronic resource]. — 2012. — Mode of Access: <https://arxiv.org/abs/1205.6318>. — Date of Access: 29.05.2012.

21. Baryshevsky, V.G.. Multiple Scattering of Waves in 3D Crystals (Natural or Photonic) Formed by Anisotropically Scattering Centers / V.G. Baryshevsky, E.A. Gurnevich // [Electronic resource]. — 2013. — Mode of Access: <https://arxiv.org/abs/1307.1544>. — Date of Access: 05.07.2013.

22. Baryshevsky, V.G.. Cherenkov and parametric (quasi-Cherenkov) radiation from relativistic charged particles moving in crystals formed by metallic wires / V.G. Baryshevsky, E.A. Gurnevich // [Electronic resource]. — 2016. — Mode of Access: <https://arxiv.org/abs/1609.05689>. — Date of Access: 19.09.2016.

## РЕЗЮМЕ

Гурневич Евгений Александрович

ГЕНЕРАЦИЯ ФОТОНОВ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ  
ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ В КРИСТАЛЛАХ,  
ОБРАЗОВАННЫХ АНИЗОТРОПНО РАССЕИВАЮЩИМИ  
ЦЕНТРАМИ

**Ключевые слова:** черенковское излучение, параметрическое излучение, амплитуда рассеяния, фотонный кристалл, электромагнитный кристалл.

Целью диссертации является теоретическое описание процессов излучения фотонов релятивистскими заряженными частицами в кристаллах, образованных анизотропно рассеивающими центрами, в частности, в фотонных кристаллах, образованных параллельными металлическими нитями.

Разработанная теория позволила установить, что, так же как и в случае изотропного рассеяния, показатель преломления и эффективные поляризуемости кристаллов определяются элементами матрицы реакций **K**, а не элементами матрицы рассеяния **T**, как это имеет место для хаотической среды.

Установлено, что действительная часть показателя преломления кристалла, образованного металлическими нитями, для TE-поляризованной волны превышает единицу, а поглощение в кристалле существенно подавлено, несмотря на сильное поглощение фотонов в металле. Как следствие, в рассматриваемом кристалле возможно черенковское излучение.

Найдена интенсивность переходного, черенковского и параметрического излучения в таком кристалле в области её максимального значения (когда длина волны сравнима с радиусом нитей). Показано, что в этой области меняется поляризация излучения, а его мощность при типичных параметрах пучков существующих и разрабатываемых ускорителей может достигать значительных величин, вплоть до сотен ГВт. Показано, что для достижения оптимальных условий генерации необходимо учитывать, что инкремент радиационной неустойчивости пучка достигает максимального значения на некотором расстоянии от точки вырождения корней дисперсионного уравнения, увеличивающемся при увеличении тока пучка.

Полученные результаты имеют большое значение для решения актуальной задачи создания мощных источников электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах. Кроме того, они могут использоваться при проектировании и разработке метаматериалов с заданными свойствами.

## РЭЗЮМЭ

Гурневіч Яўгеній Аляксандравіч

ГЕНЕРАЦЫЯ ФАТОНАЎ РЭЛЯТЫВІСЦКІМІ  
ЗАРАДЖАНЫМІ ЧАСЦІНКАМІ У КРЫШТАЛЯХ,  
УТВОРАНЫХ АНІЗАТРОПНА РАССЕЙВАЮЧЫМІ  
ЦЭНТРАМІ

**Ключавыя словы:** чаранкоўскае выпраменьванне, параметрычнае выпраменьванне, амплітуда расейвання, фатонны крышталі, электрамагнітны крышталі.

Мэтай дысертацыі з'яўляецца тэарэтычнае апісанне працэсаў выпраменьвання фатонаў рэлятывісцкімі зараджанымі часцінкамі ў крышталях, утвораных анізатропна расейваючымі цэнтрамі, у прыватнасці, у фатонных крышталях, утвораных паралельнымі металічнымі ніцямі.

Распрацаваная тэорыя дазволіла ўсталяваць, што, таксама як і ў выпадку ізатропнага расейвання, паказчык праламлення і эфектыўныя палярызуюемыя масці крышталю вызначаюцца элементамі матрыцы рэакцый **K**, а не элементамі матрыцы расейвання **T**, як гэта мае месца для хаатычнага рэчыва.

Устаноўлена, што рэальная частка паказчыка праламлення крышталю, утворанага металічнымі ніцямі, для ТЕ-палярызаванай хвалі перавышае адзінку, а паглынанне ў крышталі істотна падаўлена, нягледзячы на моцнае паглынанне фатонаў у метале. Як следства, у такім крышталі магчыма чаранкоўскае выпраменьванне.

Знойдзена інтэнсіўнасць пераходнага, чаранкоўскага і параметрычнага выпраменьвання ў такім крышталі ў вобласці яе максімальнага значэння (калі даўжыня хвалі параўнальная з радыусам ніцей). Паказана, што ў гэтай вобласці мяняецца палярызацыя выпраменьвання, а яго магутнасць пры тыповых параметрах пучкоў існуючых і распрацоўваемых паскаральнікаў можа дасягаць значных велічынь, да сотняў ГВт. Паказана, што для дасягнення аптымальных умоў генерацыі неабходна ўлічваць, што інкрэмент радыяцыйнай няўстойлівасці пучка дасягае максімальнага значэння на некаторай адлегласці ад кропкі перасячэння каранёў дысперсійнага ўраўнення, і гэта адлегласць павялічваецца пры павелічэнні току пучка.

Атрыманыя вынікі маюць вялікае значэнне для вырашэння актуальнай задачы стварэння магутных генератараў электрамагнітнага выпраменьвання ў розных спектральных дыяпазонах. Акрамя таго, яны могуць выкарыстоўвацца пры праектаванні і распрацоўцы метаматэрыялаў з зададзенымі ўласцівасцямі.

## SUMMARY

Gurnevich Evgeny Alexandrovich

EMISSION OF PHOTONS BY RELATIVISTIC CHARGED  
PARTICLES MOVING IN CRYSTALS BUILT FROM  
ANISOTROPICALLY SCATTERING CENTERS

**Key words:** Cherenkov radiation, parametric radiation, scattering amplitude, photonic crystal, electromagnetic crystal.

The aim of the thesis is to theoretically describe the processes of photon emission by relativistic charged particles moving in crystals formed by anisotropically scattering centers, in particular, in photonic crystals formed by parallel metallic wires.

The developed theory made it possible to establish that, just as in the case of isotropic scattering, the refractive index and effective polarizabilities of the crystals are determined by the elements of the reaction matrix  $\mathbf{K}$ , rather than the elements of the scattering matrix  $\mathbf{T}$ , as is the case for chaotic media.

It is established that the real part of the refractive index of a crystal formed by metallic wires exceeds unity for a TE-polarized wave, and the absorption in the crystal is substantially suppressed, despite strong absorption of photons in the metal. As a consequence, Cherenkov radiation is possible in the crystal under consideration.

The intensity of the transition, Cherenkov and parametric radiation in such a crystal in the region of its maximum (when the wavelength is comparable to the radius of wires) is found. It is shown that in this region the polarization of the radiation changes, and radiation power for typical electron beam parameters of the existing and future accelerators can reach significant values, up to hundreds of GW. It is shown that in order to achieve optimal generation conditions it is necessary to take into account that the increment of the radiation instability of the beam reaches a maximum value at some distance from the point, where dispersion equation roots degenerate. This distance increases with increasing beam current.

The obtained results are of great importance for solving the actual problem of creating powerful sources of electromagnetic radiation for various spectral ranges. In addition, they can be used for the design and development of metamaterials with specified properties.

Гурневич Евгений Александрович

**ГЕНЕРАЦИЯ ФОТОНОВ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ  
ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ В КРИСТАЛЛАХ,  
ОБРАЗОВАННЫХ АНИЗОТРОПНО  
РАССЕИВАЮЩИМИ ЦЕНТРАМИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Подписано в печать 2019 г. Формат 60 × 90 1/16.

Бумага офисная. Печать офсетная. Печ. л.

Учетн. изд. л. Тираж экз. Заказ № .

ГНУ "Институт физики им. Б. И. Степанова

Национальной академии наук Беларуси"

220072, Минск, пр. Независимости, 68.

Отпечатано на ризографе ГНУ "Институт физики  
им. Б. И. Степанова НАН Беларуси"