

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

На правах рукописи

УДК 539.1.03, 539.12.04

**ГУРИНОВИЧ  
АЛЕКСАНДРА АНАТОЛЬЕВНА**

**ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ  
РЕЛЯТИВИСТСКИМИ СГУСТКАМИ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В КРИСТАЛЛАХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

**Минск 2016**

Работа выполнена в Государственном научно-исследовательском учреждении  
”Институт ядерных проблем” Белгосуниверситета (НИИ ЯП БГУ)

Научный руководитель: **Барышевский Владимир Григорьевич**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник лаборатории  
сильноточной электроники НИИЯП БГУ

Официальные оппоненты: **Феранчук Илья Давыдович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой теоретической физики  
и астрофизики физического факультета  
Белорусского государственного университета

**Ропот Петр Иосифович**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
оптической диагностики Института физики им.  
Б. И. Степанова НАН Беларуси

Оппонирующая организация: ГНУ ”Объединенный институт энергетических  
и ядерных исследований – Сосны” НАН  
Беларуси

Защита состоится 10 июня 2016 г. в 14<sup>30</sup> часов на заседании совета по защите  
диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики им. Б. И. Степанова НАН  
Беларуси по адресу: 220072, Минск, пр. Независимости, 68, тел. 284-04-41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ ”Институт физики  
им. Б. И. Степанова НАН Беларуси”

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2016 г.

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

Выблый Ю.П.

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсивные теоретические и экспериментальные исследования физических явлений во взаимодействии рентгеновского и  $\gamma$ -излучения, заряженных и нейтральных частиц с кристаллами позволили создать исключительно важные для многих практических приложений источники спонтанного и индуцированного излучения в широкой области спектра от рентгеновского до  $\gamma$ -диапазонов, а также ускорители заряженных частиц с высоким темпом ускорения. И, в частности, разработать способы получения поляризованных и интенсивных пучков  $\gamma$ -квантов, а также методы отклонения высокоэнергетичных пучков заряженных частиц при помощи изогнутых монокристаллов.

Для обоснования и обеспечения экспериментов на современных экспериментальных установках (ускорителях, коллайдерах, лазерах на свободных электронах), использующих электронные сгустки (банчи) с длительностью от десятков наносекунд до сотен фемтосекунд, возникает необходимость описания динамики процессов спонтанного и индуцированного излучения в кристаллах.

Теоретическое описание процессов излучения рентгеновских квантов в кристаллах основано на трехмерной динамической теории дифракции рентгеновских лучей Лауэ-Эвальда, причем ее основные законы, универсальны в терминах отношения длины волны излучения к периоду кристалла. Это позволяет строить описание процесса излучения фотонов при прохождении релятивистских частиц через искусственно созданные пространственно-периодические структуры (фотонные кристаллы, метаматериалы с периодически расположенными в пространстве неоднородностями структуры) подобно описанию испускания рентгеновских фотонов при движении релятивистских частиц в естественных кристаллах.

В то же время среди всего многообразия фотонных кристаллов большое практическое значение имеют фотонные кристаллы, созданные периодически расположенными цилиндрами (в частности, металлическими), обладающими большой диэлектрической и магнитной проницаемостью. В этом случае дифракция становится двумерной и для описания процесса рассеяния электромагнитной волны на элементарном рассеивателе (кристаллической ячейке) фотонного кристалла теория возмущений, как правило, не применима, поэтому необходимо прежде всего получить выражения, описывающие преломление и дифракцию электромагнитных волн в этом случае. Для этого необходимо развитие теоретических методов описания излучения, возникающего при движении пучков релятивистских заряженных частиц через фотонные кристаллы.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с заданиями, входящими в следующие программы и проекты.

ГПФИ "Микромир и вещество", № гос. рег. 20001121, 2000–2004 гг.

ГПФИ "Микромир и вещество", № гос. рег. 20015202, 2001–2005 гг.

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.

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. 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

**Целью диссертации** является разработка теории, описывающей явление квазичеренковского излучения и дифракционного излучения релятивистского осциллятора в двумерных фотонных кристаллах, когда  $|\varepsilon - 1| \gtrsim 1$ , где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость рассеивателя, а также экспериментальная проверка некоторых ее предсказаний.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие основные задачи:

1. разработать теорию двумерной дифракции в фотонных кристаллах, образованных нитями (в частности, металлическими), и получить формулы, описывающие квазичеренковское и дифракционное излучение релятивистского осциллятора;

2. описать развитие процессов излучения фотонов в естественных и фотонных кристаллах во времени;

3. разработать теоретические методы описания спонтанного и индуцированного излучения, возникающего при движении пучков

релятивистских заряженных частиц через фотонные кристаллы, образованные металлическими нитями;

4. провести эксперименты по генерации микроволнового излучения сильноточными электронными пучками для проверки ряда предсказаний разработанной теории.

**Объектом исследования** являются радиационные процессы, сопровождающие прохождение мощных пучков релятивистских заряженных частиц через естественные и фотонные кристаллы.

**Предметом исследования** являются свойства спонтанного и индуцированного излучения, возникающего при движении сильноточных пучков релятивистских заряженных частиц через естественные кристаллы и пространственно периодические структуры, образованные нитями (в частности, металлическими), а также возможные способы создания генераторов излучения на их основе.

**Методы исследования.** При выполнении работы для исследования спонтанного и индуцированного квазичеренковского излучения при движении пучков релятивистских заряженных частиц через естественные кристаллы и пространственно периодические структуры, образованные нитями (в частности, металлическими) применялся теоретический анализ, основанный на использовании уравнений Максвелла и релятивистских уравнений движения заряженных частиц, численное моделирование и сравнение с данными экспериментальных исследований.

### **Научная новизна**

Представленные результаты являются новыми и находятся в русле мировых исследований электромагнитных процессов, сопровождающих прохождение релятивистских заряженных частиц через пространственно периодические структуры, и их применений в физике высоких энергий, физике высоких плотностей энергии и в лазерах на свободных электронах. Научная новизна работы состоит в разработке теории спонтанного и индуцированного излучения, возникающего при движении пучков релятивистских заряженных частиц через двумерные фотонные кристаллы; исследовании эволюции во времени импульса излучения, образуемого релятивистской частицей, движущейся в естественном или фотонном кристалле; а также экспериментальном подтверждении отдельных положений разработанной теории и разработке путей создания мощных источников электромагнитного излучения.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Динамическая теория двумерной дифракции в фотонном кристалле,

образованном периодически натянутыми нитями, позволившая предсказать резкое увеличение показателя преломления такого кристалла и интенсивности квазичеренковского и черенковского излучения заряженной частицы, движущейся в нем, для длины волны излучения, сопоставимой с диаметром нити.

2. Теоретическое описание эффекта задержки импульса излучения в кристалле для разных спектральных диапазонов (рентгеновского, оптического, терагерцевого и микроволнового) и экспериментальное обнаружение этого эффекта в микроволновом диапазоне.

3. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности увеличения энергии излученного импульса при генерации излучения пучком заряженных частиц в фотонном кристалле с изменяющимся периодом.

4. Предсказание и экспериментальное подтверждение существенного влияния электрического дипольного излучения на осцилляции токов и напряжений и процесс генерации излучения в параметрическом осцилляторе, образуемом системой взрывомагнитный генератор - емкостная нагрузка (например, катод-анодный промежуток сильноточного ускорителя).

### **Личный вклад соискателя**

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

В экспериментальных работах [1, 2, 11, 24, 26] автором проделан численный анализ при подготовке экспериментов и анализ данных экспериментов, задуманных и теоретически обоснованных В.Г.Барышевским и К.Г.Батраковым. В частности, дано теоретическое объяснение осцилляций мощности и спектра частот излучения, обнаруженные в эксперименте.

Идея экспериментов [12–14, 18, 20–23, 28, 34–36, 40] сформулирована автором совместно с научным руководителем. Автор диссертации участвовала в разработке конструкции экспериментальных установок, осуществляла методическое сопровождение, обработку и анализ результатов экспериментов.

В работах [7, 25, 37, 38] диссертант участвовала в разработке и анализе возможных применений создаваемых систем.

В работах [8, 9, 39] С.В. Анищенко выполнил расчет групповой скорости фотона в кристалле в условиях дифракции и для проверки проведенных

автором диссертации расчетов проделал дополнительный численный анализ интенсивности квазичеренковского излучения в кристаллах.

Автором диссертации была предложена идея, сформулированы технические требования и проделан численный анализ условий электрического взрыва проводника для осевого инициирования протяженного заряда взрывчатого вещества. Результаты экспериментального исследования разработанного совместно с П.Т.Богдановичем и А.А.Коморным устройства опубликованы в [15] и получен патент [16].

### **Апробация результатов диссертации**

Результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертации, были представлены на 21 международной конференции:

Международные конференции по лазерам на свободных электронах FEL2001 (Германия), FEL2002 (США), FEL2006 (Германия), FEL2009 (Великобритания), FEL2010 (Швеция).

Международные конференции по источникам инфракрасного, микроволнового и терагерцового излучения IRMMW-THz2004 (Германия), IRMMW-THz2007 (Великобритания), IRMMW-THz2010 (Италия).

Международная конференция по электромагнетизму EUROEM 2008 (Швейцария).

Европейская конференция микроволновая неделя Microwave Week 2003 (Германия).

Европейские конференция по мощным импульсным системам (Pulsed Power Conference) 2007 (Великобритания), 2009 (Швейцария).

Международные конференции по вопросам генерации сверхсильных магнитных полей Megagauss 2006 (Великобритания), Megagauss 2008 (Россия), Megagauss 2010 (Китай).

Международная конференция по наноэлектромагнетизму FANEM 2012 (Беларусь).

Международные конференции Channelling 2005 (Италия), Channelling 2010 (Италия), Channelling 2014 (Италия).

Европейские конференции по мощным импульсным системам EAP-PC 2008 (Литва), EAPPC 2012 (Германия), EAPPC 2014 (Япония).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Список основных работ по теме диссертации включает 49 наименований, в том числе 15 статей в рецензируемых научных журналах (общим объемом 9 авторских листа), 28 публикаций в сборниках трудов и тезисов международных конференций и один патент. Общий объем опубликованных материалов составляет 20 авторских листов.

## Структура и объем диссертации

Диссертация включает в себе оглавление, перечень условных обозначений, введение, общую характеристику работы, пять глав основного текста, из которых четыре главы содержат результаты оригинальных исследований, заключение, библиографический список и два приложения.

Полный объем диссертации составляет 157 страниц. Диссертация содержит 22 рисунка, занимающих в совокупности 10 страниц. Библиографический список включает 176 наименований и занимает 14 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**Первая глава** посвящена обзору физических явлений, сопровождающих процессы рентгеновского, оптического и микроволнового излучения, генерируемого релятивистскими заряженными частицами в естественных кристаллах и искусственных пространственно периодических структурах.

Во **второй главе** развито теоретическое описание преломления и двумерной динамической дифракции в фотонном кристалле, образованном нитями, в условиях, когда диэлектрическая проницаемость рассеивателя  $\varepsilon$  велика ( $|\varepsilon - 1| \gtrsim 1$ ) и процесс рассеяния фотона на элементарных рассеивателях, образующих фотонный кристалл, не может быть описан с помощью теории возмущений.

Электромагнитная волна, взаимодействующая с совокупностью нитей (для поляризации параллельной оси нити), описывается выражением [3]:  $\Psi(\vec{\rho}) = e^{ikz} + \sum_m F_m^{\parallel} H_0^{(1)}(k|\vec{\rho} - \vec{\rho}_m|)$ , где двумерный вектор  $\rho = \sqrt{y^2 + z^2}$ . Указанное выражение подобно выражению, полученному в трехмерном случае для описания рассеяния нейтронов [M.L. Goldberger, F. Seitz. Theory of the refraction and the diffraction of neutrons by crystals // Phys.Rev.— 1947. — Vol. 71. — P. 294—310] с заменой трехмерной функции Грина, описывающей расходящуюся сферическую волну  $\frac{e^{ik(\vec{r}-\vec{r}_m)}}{|\vec{r}-\vec{r}_m|}$  на двумерную функцию Грина, описывающую расходящуюся цилиндрическую волну, которая выражается через функцию Ханкеля  $H_0^{(1)}$ . В результате, эффективную амплитуду рассеяния электромагнитной волны на цилиндре можно записать с помощью следующей системы алгебраических уравнений [3]:

$$F_m^{\parallel} = a_0^{\parallel} e^{ikz_m} + a_0^{\parallel} \sum_{n \neq m} F_n^{\parallel} H_0^{(1)}(k|\vec{\rho} - \vec{\rho}_n|). \quad (1)$$

С помощью указанной процедуры учета влияния перерассеяния волн на совокупности периодически расположенных нитей были получены уравнения, описывающие двумерную дифракцию в таком фотонном кристалле, подобные уравнениям динамической теории Лауэ-Эвальда:

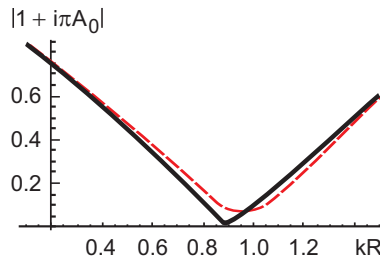
$$\left(\frac{k^2 c^2}{\omega^2} - 1 - g_0^s\right) \Phi^s - g_{-\tau}^s \Phi_\tau^s = 0, \quad \left(\frac{k_\tau^2 c^2}{\omega^2} - 1 - g_0^s\right) \Phi_\tau^s - g_\tau^s \Phi^s = 0, \quad (2)$$

где  $\vec{k}_\tau = \vec{k} + \vec{\tau}$ ,  $\vec{\tau}$  - вектор обратной решетки,  $s = 1, 2$  (1 соответствует поляризации  $\vec{E}$  параллельной нитям, а 2 - ортогональной). Входящие в (2) эффективные поляризуемости фотонного кристалла  $g_0^s$  и  $g_\tau^s$  выражаются через амплитуды  $a_0^s$  рассеяния на отдельной нити, причем  $g_0^\parallel \gg g_0^\perp$ . Для поляризации параллельной нитям в случае изотропного рассеяния ( $g_0 = g_\tau = g_{-\tau}$ ) эффективные поляризуемости имеют вид:

$$g_0^\parallel = \frac{4\pi c^2}{\omega^2 \Omega_2} \frac{A_0^\parallel}{1 + i\pi A_0^\parallel}, \quad \text{где } A_0(kR) = -\frac{i}{\pi} a_0(kR), \quad (3)$$

$$a_0^\parallel = \frac{-J_0(k_t R) J_0'(kR) + \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} J_0'(k_t R) J_0(kR)}{J_0(k_t R) H_0^{(1)'}(kR) - \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} J_0'(k_t R) H_0^{(1)}(kR)},$$

$R$  - радиус нити,  $J_0$ ,  $H_0$  - функции Бесселя и Ханкеля порядка 0,  $k_t = k\sqrt{\varepsilon(\omega)\mu(\omega)}$ ,  $\varepsilon(\omega)$  и  $\mu(\omega)$  диэлектрическая и магнитная проницаемость нити, в случае немагнитного металла  $\mu(\omega) = 1$  и  $\varepsilon(\omega) = 1 + i\frac{4\pi\sigma_t}{\omega}$ , где  $\sigma_t$  - проводимость материала нити. Из (2) и (3) вытекает, что в случае, когда  $|\varepsilon| \gg 1$ , показатель преломления фотонного кристалла ( $n^2 = 1 + g_0^\parallel$ ), образованного металлическими нитями, резко возрастает при длине волны сравнимой с диаметром нити ( $kR \sim 1$ ) в отличие от среды, образованной случайно распределенными нитями, для которой  $n^2 - 1 \sim A_0(kR)$ . На рисунке 1 показано поведение выражения  $|1 + i\pi A_0^\parallel|$  в знаменателе (3) при приближении параметра  $kR$  к единице, в случае  $|\varepsilon| \gg 1$ . Наличие этого знаменателя обуславливает существенное отличие преломления в кристалле от преломления в хаотической среде.



**Рисунок 1.** – При  $kR \sim 1$  модуль знаменателя (3) стремится к нулю: сплошная кривая – для идеального проводника, штриховая кривая – с учетом поглощения (вольфрам)

Интенсивность квазичеренковского и черенковского излучения в фотонном кристалле также существенно увеличивается при  $kR \sim 1$ ,

поскольку выражение для числа излученных квантов в кристалле толщиной  $L$  содержит аналогичный множитель [10]:

$$N_{ph}^{\parallel} \approx \alpha Q^2 \frac{1}{4 \sin^2 \theta_B} \frac{1}{k_B^4 \Omega_2} \left| 4\pi \frac{A_0^{\parallel}}{1 + i\pi A_0^{\parallel}} \right|^2 k_B L = \alpha Q^2 \frac{1}{\tau^2 k_B^2 \Omega_2} \left| 4\pi \frac{A_0^{\parallel}}{1 + i\pi A_0^{\parallel}} \right|^2 k_B L,$$

где  $\alpha$  - постоянная тонкой структуры,  $\omega_B$  - частота Брэгга,  $k_B = \frac{\omega_B}{c}$ ,  $Q$  - заряд частицы,  $\Omega_2 = d^2$  - объем элементарной ячейки кристалла с периодом  $d$ .

Число квазичеренковских фотонов с частотой 1 ТГц, испущенных электроном при толщине кристалла  $L = 10$  см, радиусе нитей, соответствующем  $kR = 0.2$ , периоде кристалла  $d \sim 0.3$  см составляет  $N_{ph}^{\parallel} = 10^{-3}$ .

При длительности сгустка  $10^{-12}$  с, числе электронов в нем  $10^{11}$  (это параметры типичные для экспериментов по лазерному ускорению) в кристалле толщиной 1 см мощность излучения в терагерцовом диапазоне может достигать гигаваттного уровня. Таким образом, сгустки частиц, получающиеся при ускорении с помощью сверхмощных и суперкоротких лазерных импульсов, могут оказаться перспективными для создания мощных источников терагерцового излучения.

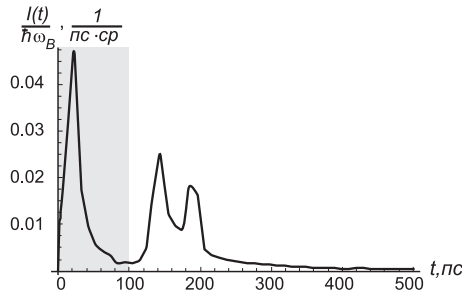
Для пучков релятивистских ядер при некомпенсированном электронной оболочкой заряде ядра  $Q \sim 30$  выход излучения может достигать одного фотона на частицу.

**Третья глава** посвящена развитию теории, описывающей временную зависимость интенсивности излучения, образуемого частицей, пролетающей через естественный или фотонный кристалл [8, 9, 39, 46]. Получены выражения для зависящей от времени интенсивности параметрического рентгеновского излучения, квазичеренковского излучения в фотонном кристалле и интенсивности излучения релятивистской частицы, движущейся в фотонном кристалле, расположенном внутри ондулятора [48].

Предсказано существование эффекта задержки импульса излучения в кристалле: в условиях брэгговской дифракции, приводящей к существенному уменьшению групповой скорости  $v_{gr}$  импульса излучения ( $v_{gr} \ll v_b$ , где  $v_b$  скорость пучка заряженных частиц), длительность импульса параметрического рентгеновского излучения в естественных кристаллах, квазичеренковского излучения в фотонных кристаллах и излучения релятивистской частицы в фотонном кристалле, помещенном внутри ондулятора, может оказываться больше времени пролета частицы через кристалл.

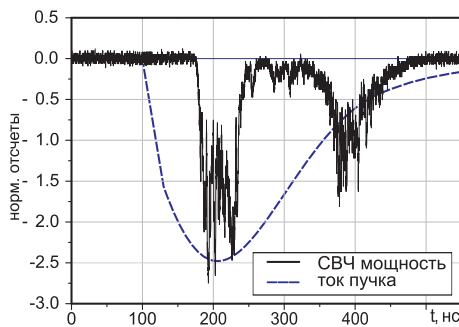
Пример временной зависимости интенсивности квазичеренковского параметрического излучения с частотой  $\nu = 1.8$  ТГц в случае двухволновой

дифракции излучения в геометрии Брэгга в фотонном кристалле с периодом  $d = 0.017$  см, длиной  $L = 3$  см, при движении в нем электронного пучка с  $\gamma = 2 \cdot 10^3$  приведен на рисунке 2 (при расчете  $\chi_0 = 5 \cdot 10^{-2}$ ,  $\chi_\tau = 2.5 \cdot 10^{-2}$ , угол Брэгга  $\vartheta_B = 60^\circ$ ).



**Рисунок 2.** – Зависимость интенсивности квазичеренковского параметрического излучения от времени для терагерцового диапазона в случае двухволновой дифракции излучения в фотонном кристалле. Серым фоном отмечен период времени, когда частица находится в кристалле

Подобное явление задержки излучения, образованного частицей, пролетающей через фотонный кристалл, наблюдается не только для спонтанного, но и для вынужденного излучения. В частности, в наших экспериментах [18, 21–23] при генерации микроволнового (диапазон 8–12 ГГц) излучения электронным пучком с энергией 250 кэВ и током  $\sim 2$  кА, движущимся в фотонном кристалле, образованном металлическими нитями, был обнаружен дополнительный импульс излучения (см. Рисунок 3). Наблюдаемая задержка соответствует групповой скорости фотонов в кристалле  $v_{gr} \sim 10^8$  см/с, т.е.  $\frac{v_{gr}}{c} \sim 10^{-2}$ .

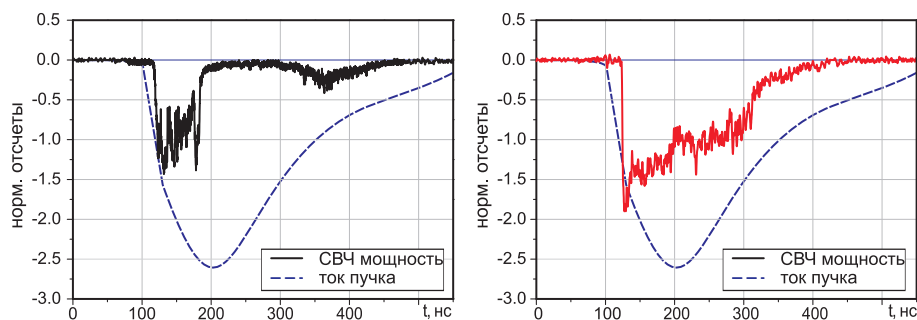


**Рисунок 3.** – Импульс излучения (сплошная кривая), синхронизированный по времени с током электронного пучка [46]

В **четвертой** главе рассмотрено индуцированное излучение, образуемое релятивистским пучком электронов, движущимся в фотонном кристалле. Получено дисперсионное уравнение, описывающее излучательную неустойчивость пучка, движущегося в фотонном кристалле ограниченных размеров [3, 4]. Квантование значений волновых векторов и смешивание мод

позволило объяснить обнаруженные в первом эксперименте, посвященном проверке основных принципов ОЛСЭ [1, 2, 11], осцилляции мощности и спектр частот излучения. В связи с тем, что эффективные поляризуемости фотонного кристалла существенно зависят от частоты излучения, получены нелинейные уравнения генерации излучения релятивистским пучком в фотонном кристалле учитывающие подобную зависимость. Получены нелинейные уравнения генерации в кристаллах с изменяющимся в пространстве периодом, применение которых позволяет компенсировать потери энергии пучка на излучение и увеличить энергию излученного импульса.

Указанный теоретический результат был подтвержден в экспериментах, проведенных нами с использованием последовательно расположенных двух фотонных кристаллов с разным периодом [20, 21]. Было продемонстрировано, что за счет выполнения условий синхронизма как в первом, так и во втором кристаллах возможно обеспечить увеличение длительности импульса излучения, а значит, и энергии излученного импульса (рисунок 4).



**Рисунок 4. – Сравнение зарегистрированных в экспериментах мощности СВЧ излучения для одного фотонного кристалла (слева) и мощности СВЧ излучения для двух последовательно расположенных фотонных кристаллов с разным периодом (справа), полученных при подаче одинаковых импульсов тока в сильноточном диоде**

**Пятая глава** посвящена анализу путей создания мощных генераторов электромагнитного излучения с высокой эффективностью.

Получены уравнения, описывающие генерацию излучения несколькими электронными сгустками с учетом разницы по времени их влета в фотонный кристалл резонатора ОЛСЭ. Показано, что двух(трех)-мерная распределенная обратная связь в фотонном кристалле резонатора ОЛСЭ создает условия для внутренней фазовой синхронизации (самофазировки), приводящей в итоге к  $N^2$ -кратному увеличению плотности мощности излучения для  $N$  электронных банчей ( $W \sim N^2$ ).

Показано существенное влияние электрического дипольного излучения на осцилляции тока и напряжения и процесс генерации излучения в

параметрическом осцилляторе, образованном системой взрывомагнитный генератор (ВМГ) - емкостная нагрузка (которой может являться, например, катод-анодный промежуток сильноточного ускорителя). Такой параметрический осциллятор описывается уравнением:

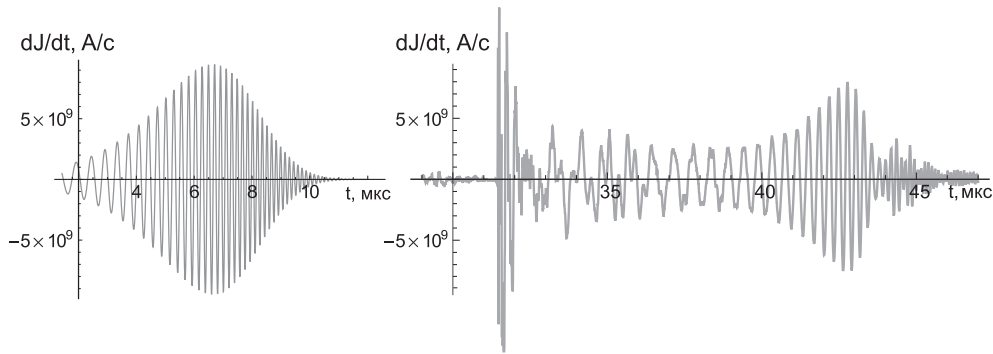
$$\frac{d^2Q(t)}{dt^2} + \frac{R_{\text{eff}}(t)}{L(t)} \frac{dQ(t)}{dt} + \omega^2(t) Q(t) = 0, \quad (4)$$

где  $R_{\text{eff}}(t) = \frac{dL(t)}{dt} + R_{\text{dif}}(t) + R_d(t) + R_m(t)$ ,  $R_{\text{dif}}$  описывает диффузионные потери,  $R_d$  и  $R_m$  потери на дипольное электрическое и магнитное излучения, соответственно,  $L(t) = L_{FCG}(t) + L_L$  - полная индуктивность цепи,  $Q(t)$  - заряд,  $J(t) = dQ(t)/dt$  - ток в цепи,  $c$  - скорость света в вакууме,

$$R_d(t) = \frac{20l_d^2\omega^2(t)}{c^2}, R_m(t) = \frac{20N^2(t) S^2\omega^4(t)}{c^4}, \omega^2(t) = \frac{1}{L(t) C_L},$$

$S$  - площадь витка индуктора ВМГ, содержащего  $N=N(t)$  последовательно соединенных витков,  $l_d$  - длина диполя, определяемого емкостной нагрузкой.

Проведенные нами эксперименты [34, 35] подтвердили существенное влияние электрического дипольного излучения на осцилляции тока (Рисунок 5) в контуре ВМГ, начальная индуктивность которого составляла 169 мкГн, индуктивность в момент замыкания кроубара - 100 мкГн, максимальное напряжение накачки 30кВ, емкость нагрузки в первой половине времени работы ВМГ - 480 пФ, во второй половине - 240 пФ.



**Рисунок 5. – Сравнение рассчитанной (слева) и измеренной в эксперименте (справа) производной тока в контуре**

Получены уравнения, описывающие влияние радиационных потерь энергии совокупности нескольких параметрических осцилляторов, каждый из которых образован системой взрывомагнитный генератор – емкостная нагрузка. На основе полученных уравнений продемонстрировано появление, благодаря наличию силы радиационного трения, коллективных колебаний при возбуждении системы  $N$  параметрических осцилляторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

В диссертации разработана теория, описывающая явление квазичеренковского излучения и дифракционного излучения релятивистского осциллятора в двумерных фотонных кристаллах в условиях, когда  $|\varepsilon - 1| \gtrsim 1$ , где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость рассеивателя. Именно значение  $\varepsilon$  обуславливает существенное отличие разработанной теории от теории параметрического рентгеновского излучения, в которой  $|\varepsilon - 1| \ll 1$ . Описана динамика процессов излучения в естественных и фотонных кристаллах. Рассмотрено индуцированное излучение, возникающее при движении пучков релятивистских заряженных частиц через фотонные кристаллы с изменяющимся пространственным периодом, которые являются важнейшим элементом резонаторов объемных лазеров на свободных электронах (ОЛСЭ). Экспериментально подтверждены отдельные положения разработанной теории.

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

- Показано, что показатель преломления фотонного кристалла, образованного металлическими нитями, резко возрастает при длине волны сравнимой с диаметром нити в отличие от показателя преломления среды, образованной случайно распределенными нитями [3, 10, 41, 42].
- Предсказано существенное возрастание интенсивности квазичеренковского и черенковского излучения в таком фотонном кристалле для длин волн, сопоставимых с диаметром нити [10, 41].
- Показано, что в терагерцовом диапазоне подобные фотонные кристаллы позволяют достичь мощности излучения гигаваттного уровня при прохождении через них электронных сгустков с длительностью  $\tau_b \sim 10^{-12}$  с и числе электронов  $n_b \sim 10^{11}$  (такие параметры могут быть получены при лазерном ускорении). Указанный результат позволяет с использованием интенсивно развивающихся методов лазерного ускорения заряженных частиц создавать мощные источники терагерцового излучения, которые являются надежным инструментом для диагностики в медицине и исследования свойств вещества, а также, например, служат основой для приборов, обеспечивающих поиск наркотиков и органической взрывчатки [7, 10, 37, 41].
- Обоснована возможность использования описанных фотонных кристаллов для регистрации одночастичных событий для пучков релятивистских ядер на современных ускорителях заряженных частиц благодаря выходу излучения до одного фотона на частицу для ядер с некомпенсированным электронной

оболочкой зарядом ядра  $Q \gtrsim 30$  [10, 41].

- Предсказано существование эффекта задержки импульса излучения в кристалле: в условиях брэгговской дифракции, приводящей к существенному уменьшению групповой скорости импульса излучения ( $v_{gr} \ll v_b$ , где  $v_b$  скорость пучка заряженных частиц), длительность импульса параметрического рентгеновского излучения в естественных кристаллах, квазичеренковского излучения в фотонных кристаллах и излучения в фотонном кристалле, помещенном внутри ондулятора, может оказываться больше времени пролета частицы через кристалл. Предсказанное явление задержки импульса излучения впервые наблюдалось в наших экспериментах в микроволновом диапазоне, в которых был зарегистрирован дополнительный пик микроволнового излучения, возникающий после пролета пучком фотонного кристалла [8, 9, 18, 21, 39, 46, 48].
- Получены нелинейные уравнения генерации излучения релятивистским пучком в фотонном кристалле с постоянным и изменяющимся в пространстве периодом с учетом зависимости от частоты эффективной диэлектрической проницаемости фотонного кристалла. На основе разработанной теории предсказана и экспериментально подтверждена возможность увеличения энергии излученного импульса при использовании фотонных кристаллов с изменяющимся в пространстве периодом [3, 4, 18–23].
- Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено существенное влияние электрического дипольного излучения на осцилляции токов и напряжений и генерацию излучения в параметрическом осцилляторе, образуемом системой взрывомагнитный генератор - емкостная нагрузка (например, катод-анодный промежуток сильноточного ускорителя) [6, 31–35].

## **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные в диссертации результаты показывают:

- перспективность использования сгустков частиц, получающихся при ускорении с помощью сверхмощных и суперкоротких лазерных импульсов, для решения актуальной проблемы создания мощных источников терагерцового излучения;
- возможность использования генерации квазичеренковского излучения в условиях поверхностной дифракции в фотонном кристалле для регистрации частиц высоких энергий на современных ускорителях благодаря испусканию фотонов под большим углом к импульсу частицы;

- быстрый фронт генерируемого импульса излучения может быть использован в качестве триггерного сигнала для синхронизации независимо измеряемых параметров пучков заряженных частиц и испускаемых ими фотонов при проведении экспериментов с использованием ускорителей частиц больших энергий;
- применение фотонных кристаллов с изменяющимся в пространстве периодом в ЛСЭ и ОЛСЭ позволяет увеличить энергию излученного импульса, повышая таким образом КПД системы;
- возбуждение излучения в фотонном кристалле  $N$  электронными пучками в условиях многоволновой дифракции приводит к росту плотности мощности излучения ОЛСЭ  $W \sim N^2$ , что позволяет создавать сверхмощные источники излучения вплоть до тераваттного уровня.

Полученные в настоящей диссертации результаты были внедрены при выполнении ряда хозяйственных договоров, ответственным исполнителем которых являлась автор диссертации:

НИР "Разработка теории, численное моделирование и создание макетов генератора СВЧ импульса на основе емкостных и индуктивных накопителей" №ЭФЛ-5/08/15 от 31.12.2008 (№гос.рег. 20090166);

НИР "Разработка теории, численное моделирование и создание макетов и экспериментальных образцов беспучкового генератора широкополосного импульса на основе индуктивного накопителя нагруженного на широкополосную антенну" №ЭФЛ-5/09/16 от 30.12.2009 (№гос.рег. 20100267);

НИР "Разработка теории, численное моделирование и создание макетов и экспериментальных образцов источников широкополосного излучения и генераторов СВЧ излучения на основе емкостных и индуктивных накопителей" № 05/12/10 от 19.10.2012г. (№ гос.рег. 20123500);

НИР "Математическое моделирование и экспериментальное исследование взрывомагнитных генераторов для работы на заданную нагрузку при фиксированных значениях максимального тока и напряжения" №262/2013 от 30.12.2013 (№ гос.рег. 20140152);

Полученные в настоящей диссертации результаты могут быть использованы в теоретических и экспериментальных исследованиях, проводимых в НИУ "Институт ядерных проблем" Белгосуниверситета, ГНУ "Институт физики имени Б.И.Степанова" НАН Беларуси, НИИ ИП с ОХП концерна Порошковой металлургии НАН Беларуси, Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси.

## Список опубликованных автором работ по теме диссертации

### Статьи в рецензируемых журналах

1. Baryshevsky, V. First lasing of a volume FEL (VFEL) at a wavelength range  $\lambda \sim 4 - 6$  mm / V. Baryshevsky, K. Batrakov, A. Gurinovich, I. Iliencko, A. Lobko, V. Moroz, P. Sofronov, V. Stolyarsky // Nucl. Instrum. Methods A. — 2002. — V. 483. — P. 21–23.
2. Baryshevsky, V.G. Progress of the volume FEL (VFEL) experiments in millimeter range / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, A.A. Gurinovich, I.I. Iliencko, A.S. Lobko, P.V. Molchanov, V.I. Moroz, P.F. Sofronov, V.I. Stolyarsky // Nucl. Instrum. Methods A. — 2003. — V. 507. — P. 137–140.
3. Baryshevsky, V.G. Spontaneous and induced parametric and Smith-Purcell radiation from electrons moving in a photonic crystal built from the metallic threads / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // Nucl. Instrum. Methods B. — 2006. — V. 252(1). — P. 92–101.
4. Барышевский, В.Г. Излучательная неустойчивость релятивистского пучка электронов, движущегося в фотонном кристалле / В.Г. Барышевский, А.А. Гуринович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2011. — Т. 4. — С. 71–78.
5. Барышевский, В.Г. Генерация излучения в лазерах на свободных электронах с дифракционными решетками (фотонными кристаллами) с изменяющимся пространственным периодом / В.Г. Барышевский, А.А. Гуринович // Вестник БГУ. — 2011. — Т. 1. — С. 5–9.
6. Барышевский, В.Г. Влияние радиационных потерь энергии на развитие колебаний в параметрическом осцилляторе, образованном системой взрывомагнитный генератор - емкостная нагрузка / В.Г. Барышевский, А.А. Гуринович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2010. — Т. 1. — С. 97–101.
7. Baryshevsky, V. Generation of medical X-ray and THz beams of radiation using table-top accelerators / V. Baryshevsky, A. Gurinovich, E. Gurnevich, A. Lobko // Nuovo Cimento C. — 2011. — V. 34(4). — P. 199–206.
8. Anishchenko, S.V. Time dependence of the intensity of parametric X-ray radiation produced by relativistic particles passing through crystals / S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // Nucl. Instrum. Methods B. — 2012. — V. 293. — P. 35–41.

9. Anishchenko, S.V. Time dependence of the intensity of parametric quasi-Cherenkov radiation produced by relativistic particles passing through electromagnetic (photonic) crystals / S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // *J. Nanophoton.* — 2012. — V. 6(1). — P. 061714-1-061714-13. — DOI: 10.1117/1.JNP.6.061714
10. Baryshevsky, V.G. Quasi-Cherenkov parametric radiation from relativistic particles passing through a photonic crystal / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // *Nucl. Instrum. Methods B* — 2015. — V. 355. — P. 69–75. — DOI:10.1016/j.nimb.2015.02.006
11. Baryshevsky, V.G. Experimental observation of radiation frequency tuning in "OLSE-10" prototype of volume free electron laser / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, A.A. Gurinovich, V.A. Evdokimov, A.S. Lobko, P.V. Molchanov, P.F. Sofronov, V.I. Stolyarsky // *Nucl. Instr. Meth. B.* — 2006. — V. 252. — P. 86–91.
12. Anishchenko, S. 2-D simulation and experimental investigation of an axial vircator / S. Anishchenko, V. Baryshevsky, A. Gurinovich, E. Gurnevich, P. Molchanov // *IEEE Trans. Plasma Sci.* — 2013. — V. 41, No. 10 — P. 2712–2716.
13. Baryshevsky, V. Magnetic field probe for noninvasive diagnostics of FCG operation: simulation and experiment / V. Baryshevsky, A. Gurinovich, V. Haurylavets, V. Tikhomirov, I. Vasiliev // *IEEE Trans. Plasma Sci.* — 2013. — V. 41, No. 10 — P. 2926–2930.
14. Baryshevsky, V. Experimental Study of an Axial Vircator with Resonant Cavity / V. Baryshevsky, A. Gurinovich, P. Molchanov, E. Gurnevich // *IEEE Trans. Plasma Sci.* — 2015. — V. 43, No. 10. — P. 3507 – 3511. — DOI:10.1109/TPS.2015.2439332.
15. Bogdanovich, P. Shock-wave initiation of a high-explosive charge to create axially symmetric detonation front / P. Bogdanovich, A. Gurinovich, A. Komornyy // *IEEE Trans. Plasma Sci.* — 2015. — V. 43, No. 10. — P. 3365 – 3368. — DOI:10.1109/TPS.2015.2449771

### **Патенты на изобретение**

16. Богданович, П.Т. Способ электрического взрывания протяженных зарядов взрывчатых веществ / П.Т. Богданович, А.А. Гуринович, А.А. Коморный // Патент на изобретение № ВУ19384. — 2015.

### **Статьи в материалах конференций**

17. Baryshevsky, V.G. Progress of the volume FEL (VFEL) experiments in millimeter range / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, A.A. Gurinovich,

I.I. Iliencko, A.S. Lobko, P.V. Molchanov, V.I. Moroz, P.F. Sofronov, V.I. Stolyarsky // 24th International Free Electron Laser Conference, 9 - 13 September, 2002 Argonne, Illinois, USA: Book of Abstracts. — 2002. — MO-P-32.

18. Baryshevsky, V.G. Experimental study of a volume free electron laser with a "grid" resonator / V.G. Baryshevsky, N.A. Belous, A.A. Gurinovich, A.S. Lobko, P.V. Molchanov, V.I. Stolyarsky // 28th International Free Electron Laser Conference, Berlin, Germany, 27 August – 1 September, 2006: Proceedings of FEL2006. [Electronic resource]. — Mode of access. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/f06/PAPERS/FEL2006-Proceedings.pdf>. — TUPPH012. — P. 331–334. — Date of access. 01.09.2012.

19. Baryshevsky, V.G. Electrodynamical properties of a volume free electron laser with "grid" resonator / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // 28th International Free Electron Laser Conference, Berlin, Germany, 27 August – 1 September, 2006: Proceedings of FEL2006. [Electronic resource]. — Mode of access. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/f06/PAPERS/FEL2006-Proceedings.pdf>. — TUPPH013. — P. 335–339. — Date of access. 01.09.2012.

20. Baryshevsky, V.G. Experimental study of volume free electron laser using a "grid" photonic crystal with variable period / V.G. Baryshevsky, N.A. Belous, A.A. Gurinovich, V.A. Evdokimov, P.V. Molchanov, A.V. Oskin, P.F. Safronov // The 29th International Free Electron Laser Conference: Proceedings of FEL2007, Novosibirsk, Russia, 26-31 August 2007. [Electronic resource]. — Mode of access. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/f07/PAPERS/proceedings.pdf>. — THAAU03.— P. 496–498. — Date of access. 01.09.2012.

21. Baryshevsky, V. Volume free electron laser with a "grid" photonic crystal with variable period: theory and experiment / V. Baryshevsky, N. Belous, A. Gurinovich, E. Gurnevich, V. Evdokimov, P. Molchanov // The 31st International Free Electron Laser Conference: Proceedings of FEL2009, Liverpool, UK, 23-28 August 2009. [Electronic resource]. — Mode of access. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/FEL2009/papers/mopc49.pdf>. — P. 134–137. — Date of access. 01.09.2012.

22. Baryshevsky, V.G. Experimental studies of volume FELs with a photonic crystal made of foils / V.G. Baryshevsky, N.A. Belous, A.A. Gurinovich, E.A. Gurnevich, V.A. Evdokimov, P.V. Molchanov // The 32nd International Free Electron Laser Conference: Proceedings of FEL2010, Malmo, Sweden, 23-27 August 2010. [Electronic resource]. — Mode of access. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/FEL2010/papers/thpb18.pdf> — P. 632–635. —Date of access. 01.09.2012.

23. Baryshevsky, V.G. Experimental studies of volume FELs with a photonic crystal / V.G. Baryshevsky, N.A. Belous, A.A. Gurinovich, E.A. Gurnevich,

V.A. Evdokimov, P.V. Molchanov // Joint 25th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves: Proceedings of IRMMW-THz 5-10 September 2010, Rome, Italy / We-F2.2. — DOI:10.1109/ICIMW.2010.5612862.

24. Барышевский, В.Г. Первое наблюдение генерации в объемном лазере на свободных электронах / В.Г. Барышевский, К.Г. Батраков, А.А. Гуринович, И.И. Ильенко, А.С. Лобко, В.И. Мороз, П.Ф. Сафронов, В.И. Столярский // IV Научный семинар памяти В.П. Саранцева, Дубна, Россия, 26-28 Сентября 2001. — С. 27–32.

25. Baryshevsky, V.G. Volume Free Electron Laser as a base for new generation of radar systems for radiolocation, navigation, Earth exploration and geophysical research / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, A.A. Gurinovich, V.I. Stolyarsky // Proceedings of International Conference Fusion 2001 (Edinburgh,UK) [Electronic resource]. — 2001. — Mode of access. <http://isif.org/fusion/proceedings/fusion01CD/fusion/searchengine/pdf/ThA23.pdf>. — Date of access 04.06.2010.

26. Baryshevsky, V.G. Wide range frequency tuning in vacuum electronic devices / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, N.A. Belous, A.A. Gurinovich, A.S. Lobko, P.V. Molchanov, P.F. Sofronov, V.I. Stolyarsky // Proceedings of 33rd European Microwave Conference, 9 October 2003, Munich, Germany / V. 3.— P. 1329–1332.

27. Baryshevsky, V.G. Wide range frequency tuning in volume free electron lasers with rectangular resonator / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics, Karlsruhe, Germany, 27 September - 1 October 2004: Proceedings of IRMMW-THz. — P. 793-794.

28. Baryshevsky, V.G. THz and MMW Sources using "Grid" Photonic Crystals / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 15th International Conference on Terahertz Electronics: Proceedings of IRMMW-THz, Cardiff, UK, 2-7 September 2007: Conference digest. — P. 245–246.

29. Baryshevsky, V.G. High power microwave sources on the basis of Volume Free Electron Laser / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // Proceedings of Pulsed Power Symposium of the Institution of Engineering and Technology, Oxfordshire, UK, 17-19 September 2007. — P. 107–112.

30. Baryshevsky, V.G. Application of volume free electron laser for development of high power microwave sources / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // European Electromagnetics Symposium, Lausanne, Switzerland, 21-25 July 2008: Abstracts of EUROEM 2008. — P. 149.

31. Baryshevsky, V.G. Radiation energy losses in a parametric oscillator formed by a flux-compression generator with a capacitive load / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // European Electromagnetics Symposium, Lausanne, Switzerland, 21-25 July 2008: Abstracts of EUROEM 2008. — P. 148.

32. Baryshevsky, V.G. Radiative losses in the system of coupled magneto-cumulative generators with capacitive loads / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich, P.V. Molchanov // Proceedings of the 11th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, London, UK, 10-14 September 2006 / Edited by I.R. Smith and B.M. Novac. — RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia, 2009. — P. 405-408.

33. Baryshevsky, V.G. Influence of radiative losses on the oscillation processes in the circuit "flux compression generator - capacitive load" / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // 12th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Novosibirsk, Russia, 13-18 July 2008: Abstracts of Megagauss XII. — P. 2.36.

34. Baryshevsky, V.G. Measurements of losses in an oscillating circuit for design of a magneto-cumulative generator of frequency / V.G. Baryshevsky, D.V. Baryshevsky, A.A. Gurinovich, I.P. Prokopovich, A.A. Rouba, B.A. Tarnopolsky, I.I. Vasiliev // Proceedings of the 13th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Shanghai, China, 6-10 July 2010 / Edited by Sun Cheigwei and Liu Cangli. — Suzhou, China, 2010. — P. 782-786.

35. Baryshevsky, V. Radio-frequency radiation from FCG with a capacitive load / V. Baryshevsky, D. Baryshevsky, A. Gurinovich, A. Rouba // 4th Euro-Asian Pulsed Power Conference (EAPPC2012), September 30 – October 4, 2012, Karlsruhe, Germany / Book of Abstracts. — P3F-3.

36. Baryshevsky, V. Experimental study of internal voltages and breakdowns in a flux-compression generator / V. Baryshevsky, A. Gurinovich, N. Belous, V. Evdokimov, A. Oskin, A. Rovba, B. Tarnopolsky, I. Vasiliev // Proceedings of 13th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Shanghai, China, 6-10 July 2010 / Edited by Sun Cheigwei and Liu Cangli. — Suzhou, China, 2010. — P. 283–288.

37. Baryshevsky, V.G. Generation of medical X-ray and terahertz beams of radiation using table-top accelerators / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich, A.S. Lobko, P.V. Molchanov // Belarussian-Swedish-Ukrainian scientific workshop on optics and laser physics: Сборник научных трудов IV Конгресса физиков Беларуси, 24–26 апреля 2013 г., Минск Беларусь / редкол.: С. Я. Килин (гл. ред) [и др.]. — Минск : Ковчег, 2013. — С. 435–436.

38. Baryshevsky, V.G. Volume free electron lasers: recent experimental studies / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich, P.V. Molchanov // Belarussian-Swedish-Ukrainian scientific workshop on optics and laser physics: Сборник научных трудов IV Конгресса физиков Беларуси, 24–26 апреля 2013 г., Минск Беларусь / редкол.: С. Я. Килин (гл. ред) [и др.]. — Минск : Ковчег, 2013. — С. 444–445.
39. Anishchenko, S.V. Time dependence of the intensity of parametric quasi-Cherenkov radiation produced by relativistic particles passing through electromagnetic (photonic) crystals / S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // Proceedings of International Conference "Fundamental and Applied NanoElectroMagnetics (FANEM'12) May 22-25, 2012, Minsk, Belarus. [Electronic resource]. — 2012. — Mode of access: <http://www.nano.bsu.by/docs/FANEM12-PROCEEDINGS.pdf> — P. 55. — Date of access: 12.03.2014.
40. Baryshevsky, V. Experimental Study of an Axial Vircator with Resonant Cavity / V. Baryshevsky, A. Gurinovich, E. Gurnevich, P. Molchanov // 5th Euro-Asian Pulsed Power Conference (EAPPC2014), September 8–12, 2014, Kumamoto, Japan / Book of Abstracts. — OA1-4.
41. Baryshevsky, V.G. Quasi-Cherenkov parametric radiation in a photonic crystal / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // 6th International Conference "Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena - Channeling 2014", October 5-10, 2014, Capri-Naples, Italy. [Electronic resource]. — Mode of access: <https://agenda.infn.it/contributionDisplay.py?contribId=28&sessionId=2> — Date of access: 20.12.2014.
42. Baryshevsky, V.G. Spontaneous and induced parametric and Smith-Purcell radiation from electrons moving in periodic media / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // International Workshop for Relativistic Channeling and Coherent Phenomena in Strong Fields, July 25-28, 2005, Frascati, Italy / Book of Abstracts. — C-3706-RC05.
43. Baryshevsky, V.G. Operation of the Prototype of a Volume Free Electron Laser / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, V.A. Evdokimov, A.A. Gurinovich, A.S. Lobko, P.V. Molchanov, P.F. Safronov, V.I. Stolyarsky // International Workshop "Relativistic Channeling and Coherent Phenomena in Strong Fields", July 25-28, 2005, Frascati, Italy / Book of Abstracts. — C-3708-RC05.
44. Baryshevsky, V. Generation of Medical X-ray and Terahertz Beams of Radiation Using Table-Top Accelerators / V. Baryshevsky, A. Gurinovich, E. Gurnevich, A. Lobko // 4th International Conference "Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena - Channeling 2010", October 3-8, 2010, Ferrara, Italy [Electronic resource]. — Mode

of access: [http://www.lnf.infn.it/conference/channeling2010/presentations/101007/ch2010\\_baryshevsky.pdf](http://www.lnf.infn.it/conference/channeling2010/presentations/101007/ch2010_baryshevsky.pdf) — Date of access: 02.02.2013.

## Препринты

45. Baryshevsky, V.G. Electrodynamical properties of a "grid" volume resonator for travelling wave tube and backward wave oscillator / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // [Electronic resource]. — 2004. — Mode of access. <http://arxiv.org/abs/physics/0409107>. — Date of access 21.09.2004.

46. Baryshevsky, V.G. Time dependence of the intensity of diffracted radiation produced by a relativistic particle passing through a natural or photonic crystal / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // [Electronic resource]. — 2011. — Mode of access. <http://arxiv.org/abs/1101.4162>. — Date of access 21.01.2011.

47. Baryshevsky, V.G. Volume free electron laser - self-phase-locking system / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // [Electronic resource]. — 2013. — Mode of access. <http://arxiv.org/abs/1301.4330v1>. — Date of access 18.01.2013.

48. Baryshevsky, V.G. Photon emission from charged particles moving in undulators placed in a photonic crystal / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // [Electronic resource]. — 2013. — Mode of access. <http://arxiv.org/abs/1306.2464>. — Date of access 11.06.2013.

49. Baryshevsky, V.G. Hybrid systems with virtual cathode for high power microwaves generation / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // [Electronic resource]. — 2009. — Mode of access. <http://arxiv.org/abs/0903.0300v1>. — Date of access 02.03.2009.

## РЕЗЮМЕ

Гуринович Александра Анатольевна

ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ  
РЕЛЯТИВИСТСКИМИ СГУСТКАМИ ЗАРЯЖЕННЫХ  
ЧАСТИЦ В КРИСТАЛЛАХ

**Ключевые слова:** квазичеренковское излучение, сильнооточный пучок, рассеяние фотона.

Целью диссертации является разработка теории, описывающей явление спонтанного и индуцированного квазичеренковского параметрического излучения и дифракционного излучения релятивистского осциллятора в условиях, когда рассеяние фотона на элементарном рассеивателе не может быть описано теорией возмущений и проведение экспериментов по генерации излучения сильнооточными пучками для проверки некоторых предсказаний разработанной теории.

Построена динамическая теория двумерной дифракции в фотонном кристалле, образованном периодически натянутыми нитями. Показано, что показатель преломления фотонного кристалла, образованного периодически натянутыми нитями, и интенсивность квазичеренковского и черенковского излучения заряженной частицы, движущейся в таком кристалле, резко возрастают для длины волны излучения, сопоставимой с диаметром нити.

Теоретически описан для разных спектральных диапазонов и экспериментально обнаружен в микроволновом диапазоне эффект задержки импульса излучения, в результате которого длительность импульса излучения оказывается больше времени пролета частицы через кристалл.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность увеличения энергии излученного импульса при генерации излучения пучком заряженных частиц в фотонном кристалле с изменяющимся периодом.

Продемонстрирована возможность возникновения коллективных колебаний (самофазировки) в системе  $N$  независимых релятивистских электронных сгустков, движущихся в фотонном кристалле, что приводит к  $N^2$ -кратному увеличению плотности мощности излучения для  $N$  независимых электронных банчей, а также возможность возникновения коллективных колебаний в системе  $N$  параметрических осцилляторов, образуемых системой взрывомагнитный генератор - емкостная нагрузка.

## РЭЗЮМЭ

Гурыновіч Аляксандра Анатольеўна

Генерацыя імпульсаў выпраменьвання рэлятывісцкімі згусткамі  
зараджаных часціц ў крышталах

**Ключавыя словы:** квазічаранковскае выпраменьванне, сильноточны пучок, расейванне фатона.

Мэтай дысертацыі з'яўляецца распрацоўка тэорыі, якая апісвае з'явы спантанага і індукванага квазічаранковскага параметрычнага выпраменьвання і дыфракцыйнага выпраменьвання рэлятывісцкага асцылятара ў ўмовах, калі расейванне фатона на элементарным расейвальніке ня можа быць апісана тэорыяй абурэнняў і правядзенне эксперыментаў па генерацыі выпраменьвання сильноточнымі пучкамі для праверкі некаторых прадказанняў распрацаванай тэорыі.

Пабудавана дынамічная тэорыя двухмернай дыфракцыі фатонаў ў крышталі, створаных з перыядычна нацягнутых дратоў. Паказана, што паказчык праламлення фатоннага крышталю, створанага з перыядычна нацягнутых дратоў, і інтэнсіўнасць квазічаранковскага і Чаранкоўскага выпраменьвання зараджанай часціцы, якая рухаецца ў такім крышталі, рэзка ўзрастаюць для даўжыні хвалі выпраменьвання, супастаўнай з дыяметрам дрота.

Тэарэтычна апісаны для розных спектральных дыяпазонаў і эксперыментальна знойдзены ў мікрахвалевым дыяпазоне эффект затрымкі імпульсу выпраменьвання, у выніку якога працягласць імпульсу выпраменьвання аказваецца больш часу пралёта часціцы праз крышталю.

Тэарэтычна абгрунтавана і эксперыментальна пацверджана магчымасць павелічэння энергіі імпульса выпраменьвання пры генерацыі выпраменьвання пучком зараджаных часціц у фатоннаму крышталі з зменлівым перыядам.

Прадэманстравана магчымасць ўзнікнення калектыўных ваганняў (самофазіроўкі) у сістэме  $N$  незалежных рэлятывісцкіх электронных згусткаў, якія рухаюцца ў фатоннаму крышталі, што прыводзіць да  $N^2$ -кратнага павелічэння шчыльнасці магутнасці выпраменьвання для  $N$  незалежных электронных згусткаў, а таксама магчымасць ўзнікнення калектыўных ваганняў ў сістэме  $N$  параметрычных асцылятараў, што ўтвараюцца сістэмай взрывомагнітны генератар - ёмістнага нагрук .

## SUMMARY

**Gurinovich Alexandra Anatolievna**

### **Generation of radiation pulses by relativistic beams of charged particles in crystals**

**Key words:** quasicherenkov radiation, high-current beam, photon scattering.

The aim of the thesis is to develop the theory, which could describe spontaneous and induced quasi-Cherenkov parametric radiation and diffraction radiation of a relativistic oscillator in conditions when the scattering of a photon by an elementary scatterer can not be described by the perturbation theory and carrying out experiments for generation of radiation by high-current beams to test some predictions of the developed theory.

The dynamic theory of two-dimensional diffraction in a photonic crystal formed periodically strained threads is developed. The refractive index of the photonic crystal, formed periodically strained threads, and intensity quasi-Cherenkov and Cherenkov radiation of a charged particle, moving such a crystal are shown to appear sharply increasing in case when radiation wavelength, is comparable with the thread diameter.

The effect of the radiation pulse delay is theoretically described for different spectral ranges and experimentally observed in the microwave range. Due to this effect duration of the radiation pulse, produced by a charged particle beam in a crystal, could appear longer than the time of flight of the particle through the crystal.

The possibility to increase the energy of the radiation pulse generated by beam of charged particles in a photonic crystal with variable period is theoretically substantiated and experimentally confirmed.

The possibility of occurrence of collective oscillations (phase-locking) in the system of  $N$  relativistic independent electron bunches moving in a photonic crystal causing the  $N^2$ -fold increase in the radiation power density for  $N$  independent electronic bunches, and emerging collective oscillations in a system of  $N$  parametric oscillators formed by explosive magnetic generator system - capacitive load is demonstrated.

Гуринович Александра Анатольевна

**ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ  
РЕЛЯТИВИСТСКИМИ СГУСТКАМИ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В КРИСТАЛЛАХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

Подписано в печать 2016 г. Формат 60 × 90 1/16.

Бумага офисная. Печать офсетная. Печ. л. 1.5

Учетн. изд. л. 1.2. Тираж 60 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"