

*На правах рукописи*



ОПАРИНА Юлия Сергеевна

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ИМПУЛЬСНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ  
ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ  
ТЕРАГЕРЦОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА**

1.3.4 – радиофизика

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Савилов Андрей Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН» (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты: Жуковский Константин Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (г. Москва);

Полозов Сергей Маркович, доктор физико-математических наук, профессор федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ» (г. Москва).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (г. Новосибирск).

Защита состоится «13» декабря 2021 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 при ФГБНУ «Институт прикладной физики РАН» по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [ipfran.ru](http://ipfran.ru) ФГБНУ «Институт прикладной физики РАН».

Автореферат разослан «\_\_» октября 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность темы диссертации.

Источники когерентного электромагнитного излучения, основанные на использовании в качестве рабочих сред сильноточных потоков релятивистских электронов, позволяют существенно повысить уровень мощности излучения в диапазонах длин волн, освоенных нерелятивистской электроникой, а также продвинуться в новые, доступные ранее лишь для квантовых приборов, диапазоны от субмиллиметрового до ультрафиолетового [1 – 13].

К настоящему времени теоретически исследовано и реализовано в экспериментах множество разновидностей релятивистских электронных приборов, основанных на различных механизмах индуцированного излучения частиц. При этом в сантиметровом диапазоне длин волн доминируют модификации традиционных приборов, основанных на черенковском и переходном индуцированном излучении электронных пучков [14 – 16], а в диапазоне более коротких длин волн оказываются источники, основанные на излучении потоков электронов-осцилляторов, колеблющихся либо в однородном магнито-статическом поле (мазеры на циклотронном резонансе, МЦР [17 – 21]), либо в пространственно-периодическом поле накачки (мазеры и лазеры на свободных электронах, МСЭ и ЛСЭ [21 – 32]). Использование доплеровского преобразования частоты колебаний электронов-осцилляторов, поступательно движущихся в направлении, близком к направлению СВЧ-излучения, со скоростью, близкой к световой, а также большая мощность рабочих электронных потоков дает возможность реализовать на основе этого подхода источники когерентного электромагнитного излучения с уникальными (частота и мощность) характеристиками.

В частности, в настоящее время растет интерес к созданию импульсных СВЧ-источников высокой мощности, работающих в терагерцовом (ТГц) и субтерагерцовом (субТГц) диапазонах частот. Такие источники востребованы в целом ряде важных научных и прикладных приложений: нагрев и диагностика плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза нового поколения, ускорение элементарных частиц до высоких энергий, эксперименты по исследованию и контролю различных сред (включая быструю терагерцовую спектроскопию и магнитометрию, так называемые «pump-probe» эксперименты, а также эксперименты по воздействию сильных волновых полей на свойства различных сред, включая биологические), использование мощных импульсов субТГц излучения в качестве «короткопериодных» ондуляторов для коротковолновых лазеров на свободных электронах, а также различные приложения в физике плазмы (в частности, реализация мощных плазменных источников ультрафиолетового излучения [33]).

Возможный путь реализации мощного импульсного источника, работающего в терагерцовом частотном диапазоне – использование излучения силь-

ноточного релятивистского электронного пучка. Современные относительно компактные ускорители [34, 35], в том числе установки, основанные на фотоинжекторной технике [36 – 38], способны формировать электронные пучки высокого качества с килоамперными токами, энергиями частиц от сотен кэВ до десятков МэВ и длительностями импульсов от долей пикосекунд (в фотоинжекторах) до сотен наносекунд (в уникальных термоэмиссионных установках [39]). При этом, однако, при реализации таких источников возникают проблемы обеспечения индуцированного характера и модовой селективности излучения, вызванные неизбежной сверхразмерностью пространства электронно-волнового взаимодействия, а также импульсным характером процесса излучения. Действительно, в относительно длинноволновых (сантиметровый и длинноволновая часть миллиметрового диапазоны длин волн) электронных источниках когерентного электромагнитного излучения для обеспечения индуцированного характера процесса излучения (то есть группировки электронного ансамбля на частоте волны излучения) используются, как правило, или схема генератора с обратной связью, или различные схемы усиления «затравочного» сигнала, поступающего от внешнего источника. Заметим, что тем самым попутно решается (по крайней мере – частично) и проблема одномодовой генерации, поскольку заданная рабочая мода системы или фиксируется за счет селективности системы обратной связи, или «навязывается» внешним затравочным волновым сигналом.

Для систем, рассматриваемых в настоящей работе, использование усилительной схемы представляется затруднительным вследствие как отсутствия (или труднодоступности) достаточно мощных источников входного сигнала, работающих в суб-терагерцовом и терагерцовом диапазонах, так и проблемы синхронизации этого сигнала с рабочим импульсом электронного тока. При этом важно, что в случае сильноточного релятивистского электронного потока рабочая электродинамическая система окажется неизбежно сверхразмерной и в продольном, и в поперечном направлениях. Большая протяженность пространства электронно-волнового взаимодействия обусловлена прежде всего использованием релятивистских (и, соответственно, «тяжелых») электронов, что приводит к относительной слабости электронно-волнового взаимодействия [5]. Поперечная сверхразмерность системы также должна быть достаточно большой в субТГц и ТГц диапазонах из-за проблем СВЧ пробоя, а также обеспечения прохождения по системе электронных сгустков с характерными поперечными размерами от нескольких до десятков длин волн. В такой ситуации традиционные схемы обеспечения обратной связи (например, отражение части излучения от концов рабочего пространства) могут не работать как вследствие того, что рабочий электронный сгусток относительно короткий (по сравнению с протяженностью системы обратной связи), так и из-за трудностей обеспечения селективного отражения на столь высоких частотах далеких от отсечки мод сверхразмерных систем. В то же время большая поперечная сверхразмерность электродинамической системы приводит к не-

одномодовому характеру электронно-волнового взаимодействия, поскольку, как правило, сразу несколько мод системы оказывается в резонансе с электронным пучком.

Описанные выше проблемы не являются новыми, и различные схемы организации селективного индуцированного излучения в импульсных высокочастотных системах предлагались и ранее. Можно упомянуть тут идею режима сверхизлучения коротких электронных сгустков [16, 17], использование сложных распределенных схем обратной связи [40], многоволновые схемы с умножением частоты [9, 13], а также нелинейные процессы обужения спектра генерации в режимах спонтанного усиления собственных шумов, используемых в коротковолновых ЛСЭ [13].

Упомянутые выше подходы, конечно, не носят универсального характера. В данной диссертации проблема обеспечения эффективного и селективного характера излучения решается применительно к двум случаям. Во-первых, предлагается использовать когерентное спонтанное излучение (КСИ) короткого (по отношению к длине излучаемой волны) сгустка [41, 42]. Частицы «подготовленного» сгустка излучают квазисинфазно. Процесс КСИ начинается сразу, в отличие от индуцированного излучения, которому должна предшествовать микрогруппировка частиц. Для обеспечения излучения в режиме КСИ не нужно, например, «затравочного» сигнала или же системы обратной связи. Таким образом, КСИ может быть реализовано в относительно простой и компактной системе. Кроме того, в случае достаточно протяженных сгустков интересны различные многоволновые режимы генерации, при которых КСИ вспомогательной относительно низкочастотной волны (и группировка частиц в поле этой волны) стимулирует излучение на более высокой частоте.

Второй подход, рассмотренный в данной работе, основан на формировании в сверхразмерных системах супермод Тальбо типа [43] и применим в случае относительно протяженных электронных импульсов. Основная идея заключается в том, чтобы отказаться от работы на фиксированной поперечной моде электродинамической системы. Вместо этого предлагается обеспечить условия для возбуждения высокочастотной супермоды, которая формируется фиксированным набором нескольких собственных поперечных мод сверхразмерного волновода.

Итак, данная работа посвящена проблемам реализации релятивистских электронных источников мощных импульсов когерентного электромагнитного излучения, работающих в субтерагерцовом (субТГц) и терагерцовом (ТГц) частотных диапазонах. Методы и подходы, изложенные в работе, направлены на обеспечение когерентного характера и модовой селективности излучения при использовании относительно простых сверхразмерных электродинамических систем, а также на решение естественной для приборов СВЧ-электроники задачи обеспечения относительно высоких эффективностей

электронно-волнового взаимодействия и мощностей излучаемых СВЧ-импульсов.

### **Цели диссертации**

1. Изучение особенностей процесса КСИ плотных коротких электронных сгустков, динамики частиц в процессе излучения и возможных способов повышения эффективности процесса КСИ.

2. Рассмотрение возможных методов стабилизации фазового размера электронного сгустка в процессе КСИ для обеспечения протяженности эффективного электронно-волнового взаимодействия и высокой мощности выходного излучения.

3. Разработка моделей для численного моделирования, расчеты электронно-волнового взаимодействия в источниках электромагнитных импульсов, основанных на КСИ коротких плотных фотоинжекторных электронных сгустков.

4. Исследование различных схем приборов, основанных на КСИ коротких плотных фотоинжекторных электронных сгустков, а также методов их возможной оптимизации.

5. Анализ условий, необходимых для формирования высокодобротной моды типа Тальбо. Оценка эффективности генератора с электродинамической системой, параметры которой удовлетворяют всем этим условиям.

6. Изучение проблемы конкуренции супермод типа Тальбо в системах с большой сверхразмерностью, а также возможности обеспечения селективного возбуждения рабочей супермоды.

7. Разработка моделей для аналитических оценок и численного моделирования, а также расчеты электронно-волнового взаимодействия в мощных сильноточных электронных лазерах терагерцового частотного диапазона, основанных на возбуждении супермод типа Тальбо.

### **Научная новизна**

1. Обнаружен эффект компрессии собственными полями ондуляторного КСИ. Предложено использование этого эффекта для стабилизации длины электронного сгустка в процессе излучения в различных схемах генераторов субТГц и ТГц излучения. Проведены детальные численные расчеты различных схем источников на основе ондуляторного КСИ, в которых данный эффект позволяет обеспечить высокую эффективность электронно-волнового взаимодействия.

2. Исследованы методы повышения эффективности источников на основе ондуляторного КСИ, в которых для стабилизации размера электронного сгустка при его движении по протяженному рабочему ондулятору используется режим отрицательной массы.

3. Обнаружен эффект компенсации влияния кулоновского взаимодействия частиц на фазовый размер сгустка, имеющий место в случае реализации циклотронного КСИ в режиме группового синхронизма электронов с волной. Проведены детальные численные расчеты источников на основе циклотронного КСИ плотных коротких фотоинжекторных электронных сгустков.

4. Предложены различные двухволновые схемы реализации источников на основе ондуляторного и циклотронного излучения плотных коротких фотоинжекторных электронных сгустков, в которых компрессия или микрогруппировка электронов в поле излучаемой относительно низкочастотной волны обеспечивает эффективное излучение волны на высокой частоте.

5. Предложена новая схема генератора, основанного на селективном возбуждении в сверхразмерной электродинамической схеме супермоды типа Тальбо. Проведены детальные расчеты электронно-волнового взаимодействия в электронных мазерах терагерцового частотного диапазона, основанных на возбуждении супермод Тальбо-типа.

6. Исследована структура собственных супермод резонатора Тальбо-типа. Показана возможность селективного возбуждения рабочей супермоды.

**Практическая значимость работы** связана с созданием импульсных источников субтерагерцового и терагерцового излучения с относительно высокими уровнями мощности и пиковой интенсивности волнового электрического поля. Применение предложенных в данной работе методов и подходов позволит создать новые приборы с уникальными характеристиками.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы [A1 – A34] опубликованы в реферируемых российских и зарубежных журналах и докладывались на 43-й и 44-й Международных конференциях по инфракрасным и миллиметровым волнам (Нагоя, Япония, 2018; Париж, Франция, 2019), 18-й и 22-й Международной конференции по вакуумной электронике (Лондон, Великобритания, 2017; Амстердам, Нидерланды, 2021), 47-й Международной конференции по наукам о плазме (Сингапур, 2020), 39-й международной конференции по лазерам на свободных электронах (Гамбург, Германия, 2019), Международных конференциях «ФизикАСПБ 2018/2019/2020» (Санкт-Петербург, Россия, 2018-2020), 10-м и 11-м Всероссийских семинарах по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, 2016, 2018), 15-й и 17-й, 18-й научной школе «Нелинейные волны – 2018» (Нижний Новгород, 2018), 3-й и 4-й Международных конференциях «Терагерцовое и СВЧ излучение: генерация, детектирование и приложения (ТЕРА-2018/2020)» (Нижний Новгород, Россия, 2018; Томск, Россия, 2020) и Международной конференции «микроволновое и терагерцовое излучение: источники и приложения» (Россия, 2018).

## Личный вклад автора в проведенные исследования

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [A1 – A34], получены либо при непосредственном участии автора, либо лично автором. Вклад соискателя состоял в аналитическом исследовании электронно-волнового взаимодействия в предложенных в диссертации схемах электронных источников импульсного терагерцового излучения, анализа и оптимизации параметров, а также в последующем моделировании систем. На основе оригинальных численных кодов, написанных автором, был спроектирован и рассчитан ряд экспериментальных макетов. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавторов совместных работ. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводилась совместно с научным руководителем и соавторами.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка трудов по диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 149 страниц. Диссертация содержит 86 иллюстраций, 1 таблицу и список литературы из 136 наименований. Список публикаций автора по теме работы содержит 34 наименования.

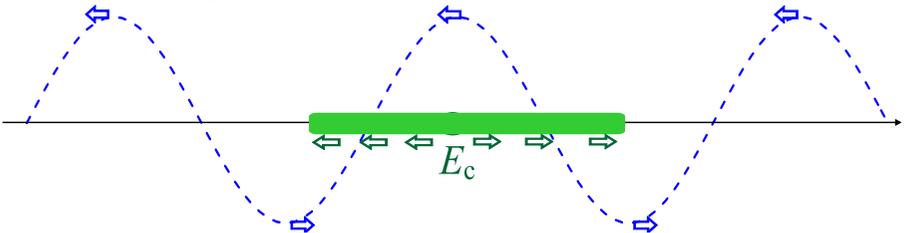
## Содержание работы

**Глава 1** посвящена источникам, основанным на когерентном спонтанном излучении плотных электронных сгустков. Режим когерентного спонтанного излучения (КСИ) реализуется, когда фазовый размер электронного сгустка относительно излучаемой волны меньше  $2\pi$ , то есть сгусток сгруппирован относительно излучаемой волны, так что частицы излучают квази-синфазно. Использование спонтанного излучения «специально подготовленных» коротких (по отношению к длине излучаемой волны) электронных сгустков решает как проблему селекции, так и проблему эффективности генерации волновых импульсов при движении электронного сгустка по относительно короткой и простой системе электронно-волнового взаимодействия.

Следует обсудить предпосылки, обуславливающие возвращение к идее КСИ, высказанной достаточно давно [41, 42]. Благодаря развитию ускорителей, в первую очередь фотоинжекторных [36 – 38], стало возможным формирование коротких плотных электронных сгустков с достаточно высокими плотностями заряда (с начальными длинами 0.1 – 1 мм и полными зарядами 0.1 – 1 нКл) и начальными энергиями частиц 3 – 7 МэВ (что соответствует релятивистским Лоренц-факторам  $\gamma = 7 – 15$ ). Когерентное спонтанное излучение сгустков с длительностями электронного импульса  $\sim 1$  пс будет происходить в ТГц и субТГц частотных диапазонах. Таким образом, КСИ фотоинжекторных электронных сгустков можно рассматривать как один из возможных вариантов реализации источников ультракоротких мощных терагерцовых импульсов.

В случае КСИ волновые пакеты, излучаемые электронами, складываются почти в фазе. Другими словами, сгусток изначально сгруппирован относительно излучаемой волны, поэтому излучение начнётся сразу, что является важным преимуществом режима КСИ по сравнению с режимом индуцированного излучения, которому должна предшествовать группировка частиц. Ещё одним преимуществом КСИ является возможность его реализации в относительно простой электродинамической системе (без цепи обратной связи и «затравочного» волнового сигнала). Фаза излучаемого в режиме КСИ волнового пакета фиксирована, что необходимо, например, для «pump-probe» экспериментов [44 – 46]. При этом можно обеспечить условия для относительно высокой эффективности КСИ.

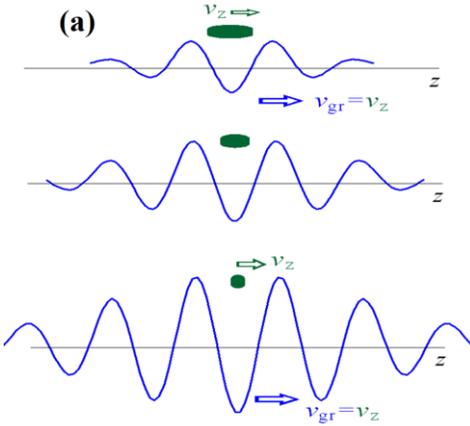
Приведём простые оценки для параметров излучения сгустков, формируемых на современных фотоинжекторах. Если эффективность электронно-волнового взаимодействия составляет  $\sim 10\%$  при длине волны  $\lambda \sim 1$  мм и длительности волнового импульса  $\sim 5 - 7\lambda$  ( $\sim 20$  пс), а излучение происходит в волноводе с площадью поперечного сечения  $S_w \sim \pi\lambda^2$ , то усреднённая мощность излучения будет на уровне нескольких десятков МВт, что соответствует пиковому электрическому полю  $E \sim 100$  МВ/м.



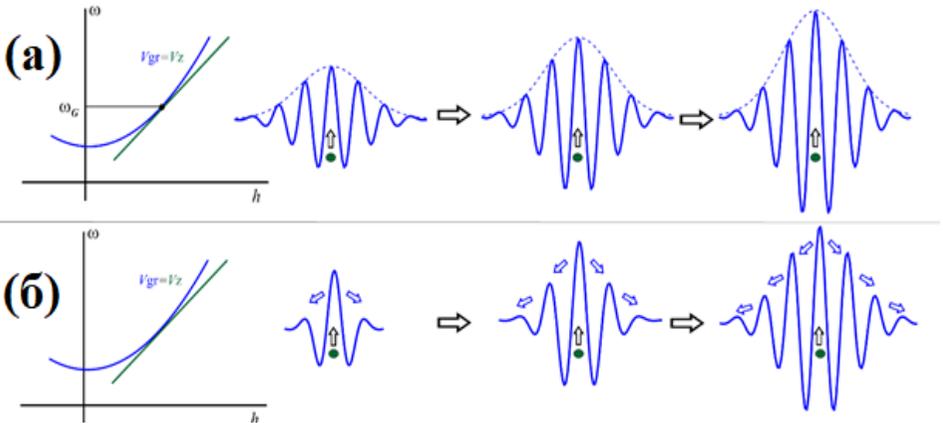
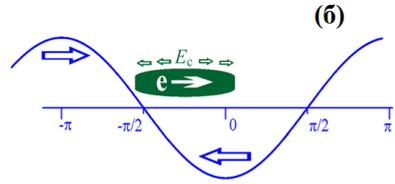
**Рис. 1.** Увеличение фазового размера сгустка относительно излучаемой волны в результате увеличения длины электронного сгустка в случае ондуляторного/Черенковского излучения

Однако есть у режима КСИ и серьёзный недостаток. Излучение происходит в спонтанном режиме до тех пор, пока фазовый размер электронного сгустка не превышает  $2\lambda$ . Для приборов с продольной группировкой частиц (основанных на ондуляторном или черенковском механизмах излучения) это требование эквивалентно тому, что длина электронного сгустка должна быть меньше длины излучаемой волны  $L_e < \lambda$  (рис. 1). Этот факт ограничивает интенсивность электронно-волнового взаимодействия, поскольку процесс излучения в режиме КСИ выходит на насыщение, как только фазовый размер сгустка увеличивается до  $2\lambda$ . Очевидно, что чем больше заряд электронного сгустка, тем выше должна быть мощность выходного излучения, однако увеличение линейной плотности заряда приведёт к усилению влияния кулоновских полей на движение частиц и, как следствие, на длительность процесса КСИ.

Поскольку линейная плотность заряда в фотоинжекторных сгустках велика, в отсутствии каких-либо дополнительных механизмов продольной стабилизации их длины из-за кулоновского растяжения увеличиваются в несколько раз на расстояниях  $\sim 10 - 30$  см [47]. К фазовой дестабилизации электронного сгустка относительно волны может приводить не только кулоновское взаимодействие, но и непосредственно электронно-волновое взаимодействие. По этой причине в данной работе особое внимание уделяется возможным методам стабилизации фазового размера (длины) электронного сгустка.



**Рис. 2.** Компрессия электронного сгустка собственным полем излучения в режиме группового синхронизма (а). Расположение электронного сгустка относительно фазы волны (б)



**Рис. 3.** Схемы электронно-волнового взаимодействия в приближении медленно меняющейся амплитуды огибающей волнового импульса с фиксированной опорной частотой (а) и формирования волнового пакета в режиме КСИ (б): усиление центрального цикла и перераспределение мощности по циклам вследствие дисперсии

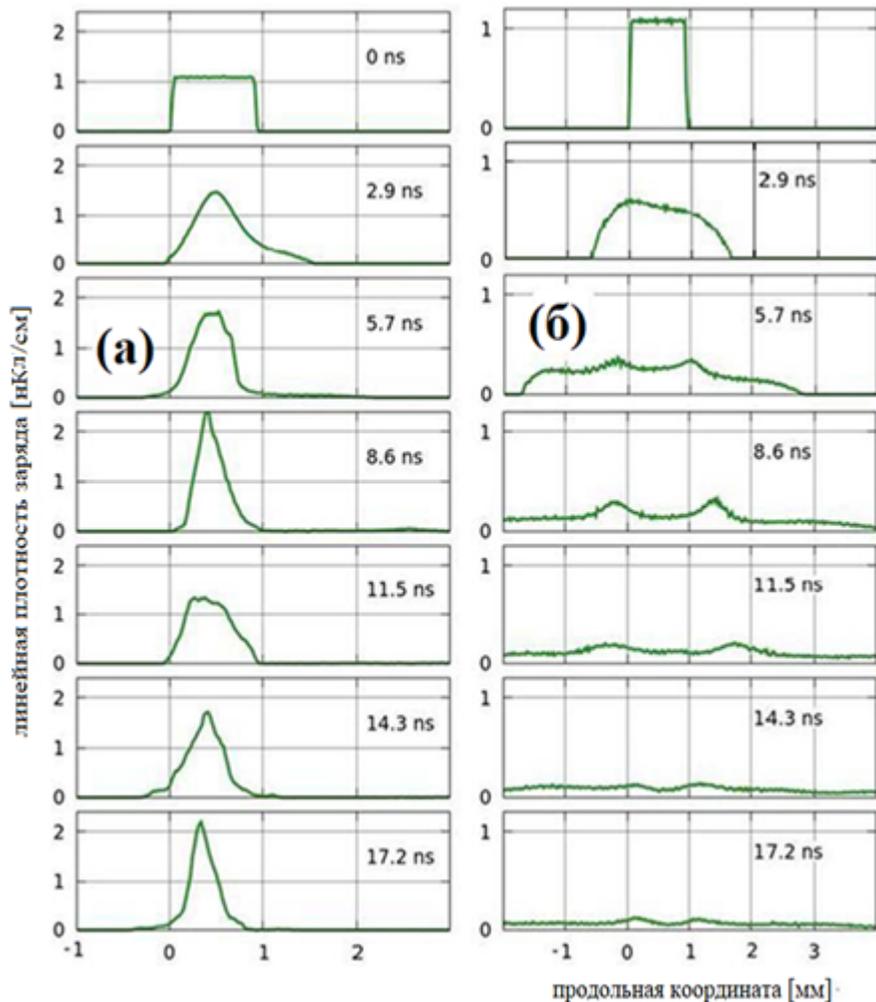
В **разделе 1.1** подробно описан эффект компрессии собственными полями ондуляторного КСИ [A1] (рис. 2, а). Этот эффект реализуется благодаря «правильному» сдвигу фазы электронного сгустка относительно излучаемого им волнового пакета (рис. 2, б), который обеспечивается в процессе излучения «автоматически» в случае, когда поступательная скорость электронов близка к групповой скорости излучаемого волнового пакета. Если электронный сгусток не «проскальзывает» относительно максимума излучаемого импульса, тормозиться будут преимущественно частицы, летящие впереди. Таким образом, электронный сгусток будет сжиматься в направлении своего заднего фронта («хвоста»).

В этом разделе приведены аналитические оценки и результаты численного моделирования в двух различных приближениях. Во-первых, в простом приближении взаимодействия частиц с «заданным» импульсом, опорная частота которого зафиксирована (рис. 3, а). Аналитически показано наличие смещения эффективной фазы электронов относительно излучаемой волны, благодаря которому становится возможна компрессия электронного сгустка собственными полями КСИ, приведён анализ области оптимальных с точки зрения компрессии параметров системы. Более корректно в случае КСИ второе описанное в работе приближение: представление в виде излучения набора макрочастиц. В таком приближении не вводятся ни опорная частота, ни медленная огибающая волнового импульса (рис. 3, б). В этом случае волновое уравнение решается «напрямую». Такое приближение даёт возможность проанализировать структуры электрических полей излучаемых импульсов. Для проверки полученных результатов было проведено более сложное трёхмерное численное моделирование на основе пик-кода «KARAT» (рис. 4) [48].

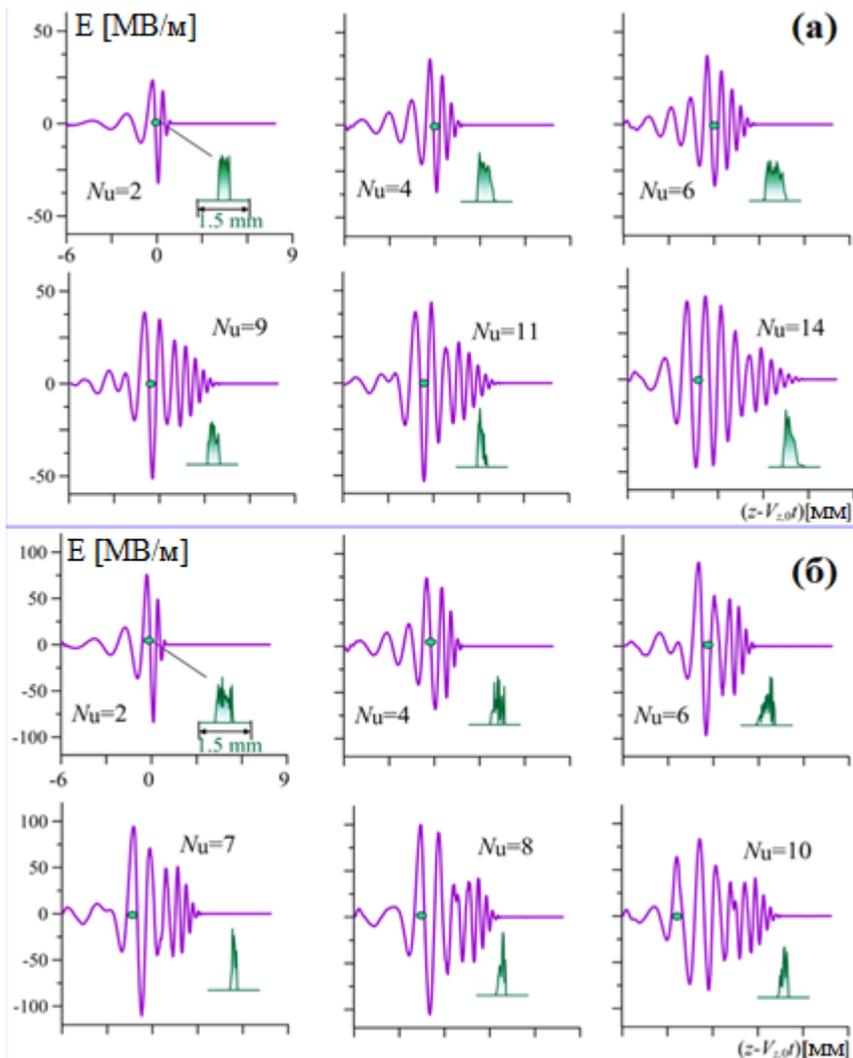
В рамках второго приближения исследован процесс формирования излучаемого импульса. Электронный сгусток в процессе первого ондуляторного колебания излучает один цикл электромагнитной волны, длина которой соответствует доплеровски преобразованному периоду ондулятора, если групповая скорость излучаемого волнового пакета совпадает с поступательной скоростью электронов (рис. 3, б). Этот цикл волны не покидает область электронного сгустка и, таким образом, на каждом из последующих периодов ондулятора цикл усиливается, но из-за наличия дисперсии в системе энергия из этого центрального цикла, в области которого находится сгусток, рассеивается в соседние циклы. В соответствии с результатами численного моделирования амплитуды полей излучаемых импульсов составляют несколько десятков МВ/м (~20 – 100 МВ/м), длительности волновых импульсов – несколько десятков пикосекунд [A2] (рис. 5).

В **разделе 1.2** предлагается ещё один метод стабилизации, основанный на использовании так называемого режима отрицательной массы, который реализуется в ондуляторе с ведущим магнитным полем (см., например, [47]). Если циклотронная частота колебаний  $\Omega_c = eB_0/(m\gamma)$  слегка превышает их баунс-частоту  $\Omega_u = h_u V_z$ , зависимость поперечной (осцилляторной) скорости

частиц от их энергии приводит к «аномальной» дисперсии поступательной скорости, при которой рост энергии частиц ведет не к росту, а к уменьшению поступательной скорости (рис. 6, а). В такой ситуации кулоновское взаимодействие, очевидно, приведет не к увеличению длины сгустка, а к её сокращению (рис. 6, б). В соответствии с расчётами, эффективность излучения в режиме отрицательной массы может быть повышена в 2 – 3 раза.



**Рис. 4.** Динамика линейной плотности заряда в электронном сгустке в случае группового синхронизма (а) и при наличии проскальзывания (б)



**Рис. 5.** Излучаемое электрическое поле и распределение заряда внутри электронного пучка в различных точках области электронно-волнового взаимодействия в случаях полного заряда в электронном сгустке 0,5 нКл (а) и 2 нКл (б)

**Раздел 1.3** посвящён циклотронному излучению, в условиях которого группировка электронов по фазам относительно излучаемой волны двумерна. При этом кулоновское взаимодействие частиц вносит противоположные по знакам возмущения в продольную и поперечную компоненты фазы частицы относительно излучаемой волны. Важным результатом является доказатель-

ство того, что в режиме группового синхронизма электронов с излучаемой волной реализуется взаимная компенсация изменений продольной и поперечной компонент фазы. Таким образом, несмотря на то, что длина электронного сгустка увеличивается вследствие кулоновского взаимодействия, его фазовый размер не меняется [A2] (рис. 7). Иначе говоря, стабилизация фазового размера реализуется автоматически

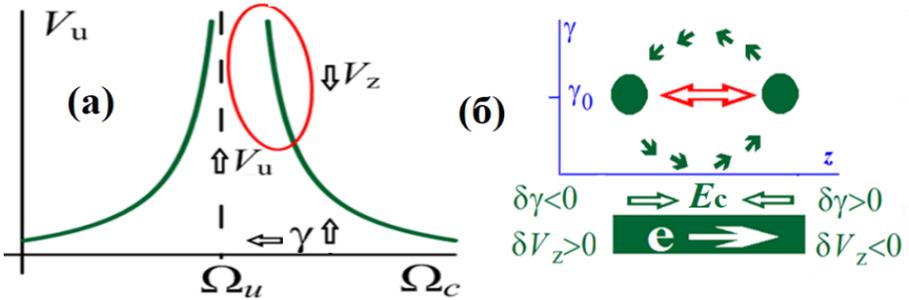


Рис. 6. Режим отрицательной массы. Зависимость поперечной скорости от частоты (энергии) (а), схема компрессии собственными кулоновскими полями (б)

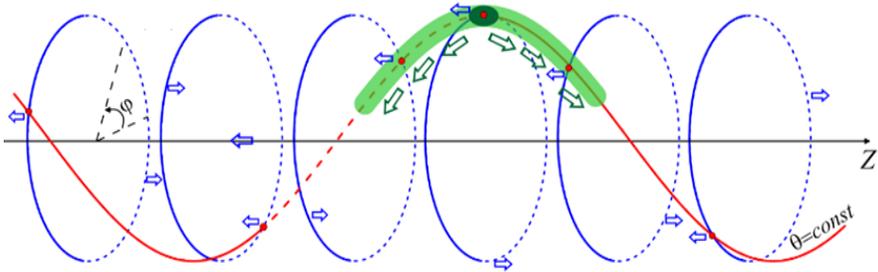


Рис. 7. Растяжение электронного сгустка вдоль двумерной траектории, на которой фаза частиц относительно волны постоянна

**Глава 2.** Во второй главе описываются различные многоволновые режимы генерации, предлагается использовать относительно низкочастотное КСИ в качестве «вспомогательного». В частности, предложены двухволновые режимы, реализующиеся по следующей схеме: спонтанная генерация относительно длинноволнового излучения, в поле которого обеспечивается компрессия электронного сгустка для реализации относительно высокочастотного излучения в режиме КСИ [A4] или стабилизация фазового размера сгустка в процессе микрогруппировки частиц относительно высокочастотной волны [A5], что приводит к значительному повышению эффективности её излучения [A4]. КПД коротковолнового излучения в таких режимах достаточно высока за счёт эффективной группировки электронов и последующей дополнительной стабилизации фазового размера относительно длинноволновым излуче-

нием. Также в этой главе обсуждается вопрос конкуренции двух поперечных мод.

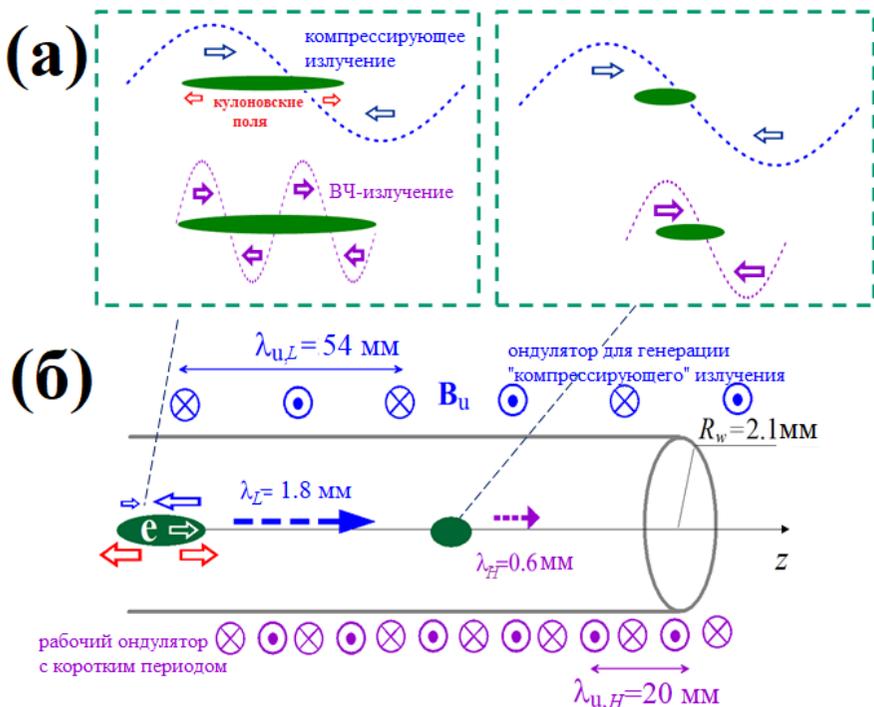
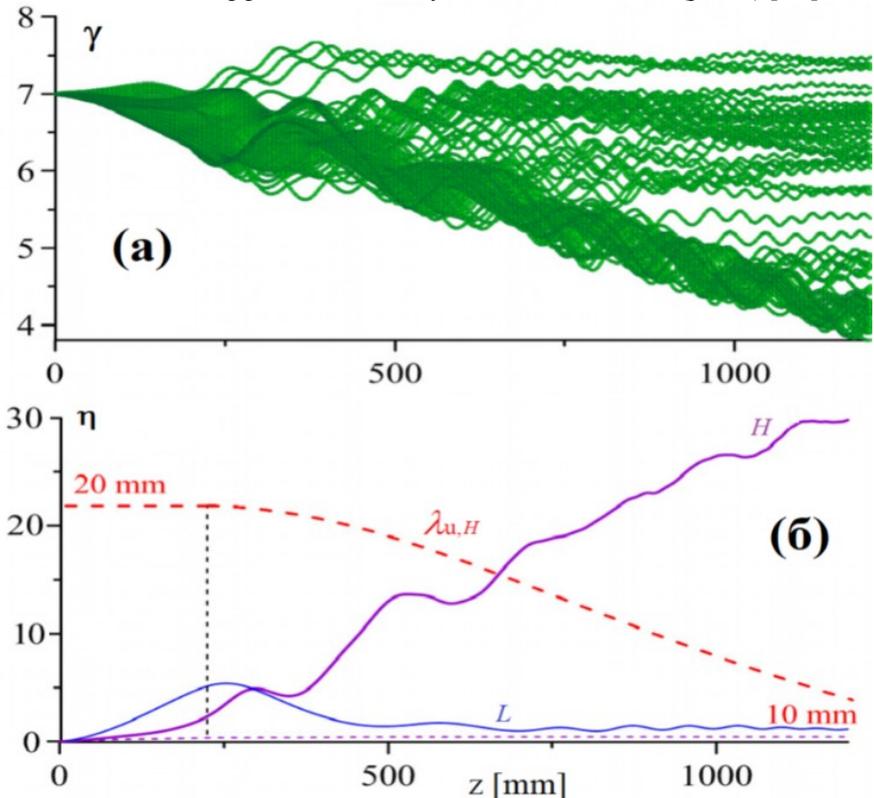


Рис. 8. Реализация схемы каскадного излучения в системе, включающей в себя два ондулятора

В разделе 2.1 предложена схема каскадного излучения, основанная на использовании описанного в 1.1 эффекта продольной компрессии собственными полями излучения [A4]: когерентная спонтанная генерация низкочастотной (НЧ) волны  $\rightarrow$  компрессия собственными полями электронного сгустка  $\rightarrow$  КСИ высокочастотной (ВЧ) волны. Такая схема наиболее эффективно может быть реализована в системе, включающей два ондулятора с разными периодами (рис. 8): в ондуляторе с большим периодом излучается низкочастотная компрессирующая волна, а в рабочем ондуляторе с меньшим периодом происходит высокочастотная генерация. Использование такой схемы позволяет обеспечить достаточно высокий КПД высокочастотного излучения. Например, для электронного сгустка с начальной энергией частиц 3 МэВ, с зарядом 0.3 – 1.0 нКл, поперечным размером 2 мм, длиной 0.9 мм (3 пс), в волноводе с диаметром 24.2 мм, который движется в магнитном поле двух ондуляторов (период «вспомогательного» ондулятора 54 мм, период рабочего ондулятора 20 мм, параметр ондуляторности обоих ондуляторов  $K = 0.8$ ),

эффективность излучения на частоте 0.5 ТГц составляет 10%. В системе с профилированием благодаря обеспечению захвата частиц можно добиться ещё более высокой эффективности излучения в такой схеме (рис. 9) [A4].



**Рис. 9.** Процесс двухволнового каскадного КСИ в системе с профилированием. Изменение энергий частиц (а), эффективность излучения и закон профилирования периода ондулятора (б)

Как показано в [разделе 2.2](#), каскадный режим КСИ может быть реализован и в системе с одним ондулятором, однако в этом случае эффективность генерации ВЧ волны невелика, поскольку, в отличие от схемы с двумя ондуляторами, в этом случае нельзя обеспечить КСИ обеих волн в режиме группового синхронизма. В то же время, важным результатом является обнаружение того факта, что использование двухволновых режимов оказывается привлекательным и при относительно больших длинах электронных сгустков, когда генерация ВЧ волны может происходить только в режиме индуцированного излучения. Оказывается, генерация НЧ излучения в режиме КСИ значительно улучшает условия для процесса микрогруппировки частиц отно-

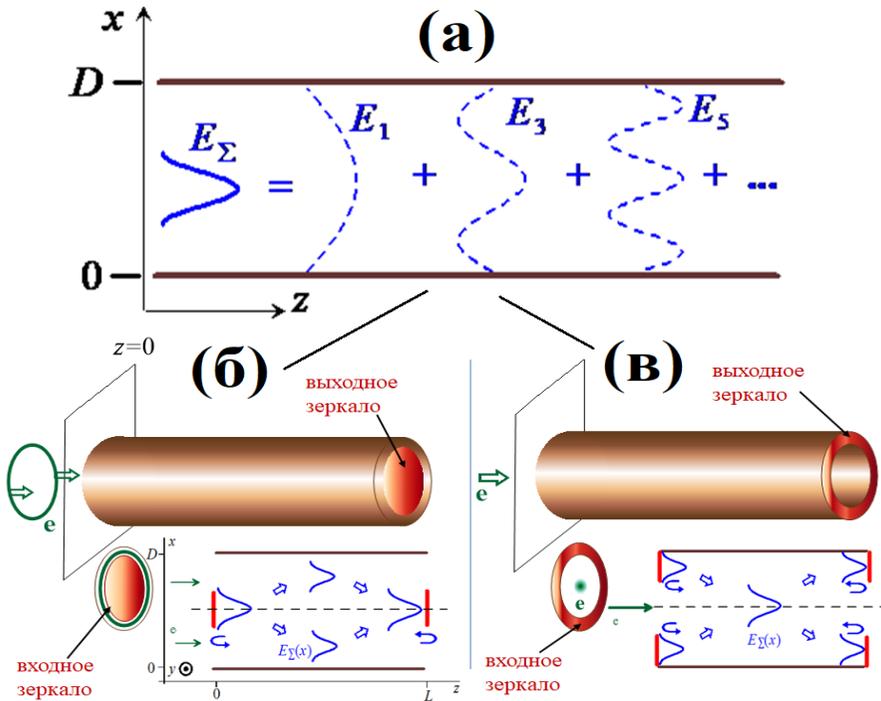
сительно ВЧ волны. Эффективность процесса индуцированного излучения высокочастотной волны может быть существенно увеличена за счет использования генерации тем же сгустком вспомогательной низкочастотной волны в режиме КСИ [A5]. При оптимальной длине электронного сгустка (слегка меньшей или примерно равной длине низкочастотной волны) можно обеспечить достаточно высокий уровень эффективности индуцированного излучения. При этом мощность излучаемого импульса и, соответственно, амплитуды полей излучения будут расти с увеличением полного заряда электронного сгустка. Так, в рассмотренном в диссертации примере амплитуда электрического поля излучаемого импульса составила  $\sim 300$  МВ/м.

В этом же разделе обсуждается вопрос конкуренции двух поперечных мод в условиях, когда низшая мода возбуждается в режиме пересечения дисперсионных характеристик, а более высокая в режиме группового синхронизма. Благодаря последнему обстоятельству значительно улучшаются условия для возбуждения более высокой моды, так что эффективности электронно-волнового взаимодействия с обоими волновыми пакетами в режиме их КСИ оказываются близки. Если же волновой пакет, соответствующий более высокой моде, излучается в режиме КСИ (или близком к КСИ), а излучение на низшей моде носит индуцированный характер, на процесс конкуренции этих мод существенное влияние оказывает динамика частиц электронного сгустка. Так, например, если излучение происходит при движении частиц в режиме отрицательной массы, то при определённом начальном размере электронного сгустка возможно полное подавление генерации низшей моды. В обычном же режиме при прочих равных условиях низшая мода будет преобладать.

**Раздел 2.3** посвящён двухволновым режимам циклотронного излучения. Рассматривается несколько методов реализации высокочастотного излучения плотного электронного сгустка в режиме, близком к авторезонансу [49, 50], когда фазовая скорость волны близка к скорости света. Проблема реализации процесса излучения в таком режиме обусловлена тем, что в режиме авторезонанса электронно-волновое взаимодействие очень слабо влияет на группировку частиц, что является неоспоримым преимуществом, если сгусток уже сгруппирован относительно волны (т.е. если его длина достаточно мала в масштабе длины ВЧ волны). При этом, однако, если длина электронного сгустка относительно велика, то для генерации ВЧ волны требуется какой-то дополнительный механизм группировки. Таким механизмом может служить группировка частиц в поле генерируемой в режиме КСИ вспомогательной низкочастотной волны [A6].

**Глава 3.** Метод повышения селективности, предложенный в этой главе, концептуально отличается от КСИ, обсуждаемого в двух предыдущих главах. Здесь речь идёт об обеспечении селективного возбуждения высокодобротной супермоды типа Тальбо в сверхразмерных системах. На примере простой

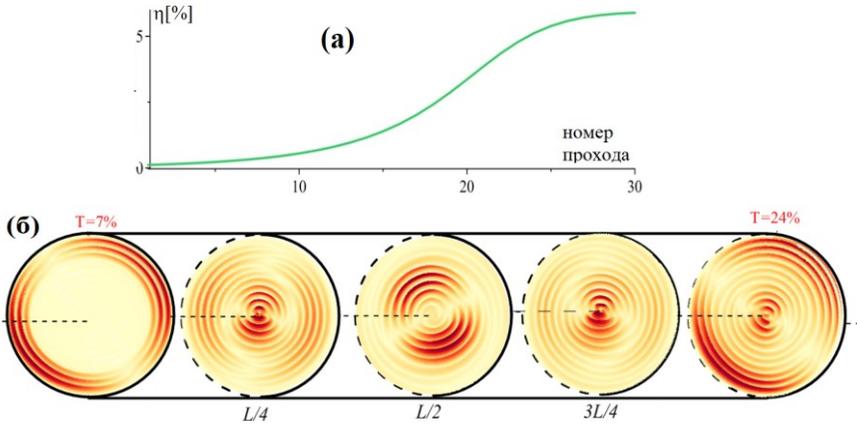
двумерной модели плоского резонатора показано, что при определённых условиях набор собственных парциальных мод системы формирует супермоду (рис. 10, а), которую можно «запереть» в резонаторе, установив простые зеркала на входе и выходе. Эти результаты обобщаются на случай трёхмерного цилиндрического резонатора [А7]. В данной главе также обсуждается вопрос конкуренции супермод. Получены условия, при которых в системе с большой сверхразмерностью остаётся только одна низшая супермода [А8].



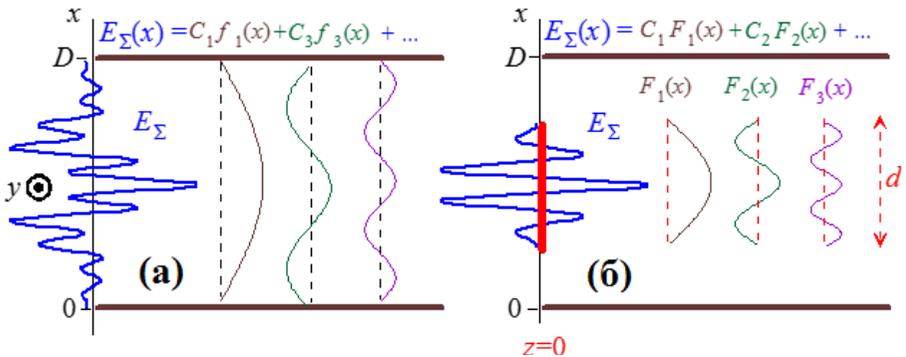
**Рис. 10.** Схема формирования супермоды типа Тальбо (а). Различные конфигурации резонаторов для возбуждения супермоды типа Тальбо (б) и (в)

В разделе 3.1 описан простой подход, основанный на использовании эффекта Тальбо [43], который представляет собой периодическое воспроизведение поперечной структуры волнового поля, образованного сложением парциальных поперечных мод с «правильными» фазами. Этот эффект широко используется в различных электродинамических схемах электронных лазеров и ускорителей. Этот подход может быть использован для фиксации рабочей высокочастотной супермоды в простой микроволновой системе, состоящей из отрезка волновода, ограниченного двумя простыми зеркалами (см. рис. 10, б и в): поле супермоды присутствует только на зеркалах, что обеспечивает ее

высокую добротность. Здесь важно отметить, что для каждой из парциальных поперечных мод системы по отдельности зеркала обеспечивают лишь частичное отражение и, соответственно, низкую добротность этих волн. В этом же разделе приведена система самосогласованных уравнений, описывающая электронно-волновое взаимодействие в такой системе, продемонстрирована возможность селективного возбуждения супермоды.



**Рис. 11.** Эффективность электронно-волнового взаимодействия, как функция числа проходов (а) и поперечная структура поля супермоды (б), в «горячем» приближении



**Рис. 12.** Разложение поля волны по собственным поперечным модам волновода (а), на зеркале по синусоидам с разным числом вариаций (б)

Предлагается проект сильноточного лазера на свободных электронах (МСЭ), схема которого приведена на рис. 10, в. Результаты численного моделирования оказались очень привлекательными с точки зрения их возможной реализации. В случае тока, близкого к стартовому  $I = 2$  кА, эффективность излучения в установившемся режиме составляет примерно 6%. Такая эффек-

тивность соответствует выходной мощности излучения, близкой к 1 ГВт, на частоте 2 ТГц (см. рис. 11, а). Во входном/выходном сечениях поле есть только в области зеркал (рис. 11, б).

В **разделе 3.2** подробно обсуждаются особенности формирования супермоды в резонаторах с разной геометрией (в простейшем случае плоского двухмерного резонатора с эквидистантным спектром поперечных мод, а также в случае волновода с круглым поперечным сечением, спектр собственных мод имеет квазиэквидистантный характер). Показано, что можно ввести набор взаимно ортогональных супермод (см. рис. 12, а). В некотором смысле это аналогично представлению поля волновода как набора ортогональных поперечных мод, но структура супермод имеет принципиально многомерный (продольно-поперечный) характер (сравните рис. 12, а и б). Важно, что разные супермоды имеют разную дифракционную добротность. Это связано с приближенным характером эффекта Тальбо [А8]. Благодаря этому можно найти диапазон параметров резонатора, в котором только одна низшая высокодобротная супермода может быть возбуждена рабочим электронным пучком.

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

1. В процессе когерентного спонтанного ондуляторного излучения короткого (в масштабе длины волны) электронного сгустка в режиме группового синхронизма может наблюдаться эффект компрессии этого сгустка собственными полями излучения. Этот эффект может быть использован для стабилизации размера электронного сгустка в процессе его движения по относительно протяженному пространству электронно-волнового взаимодействия в источнике, основанном на излучении такими сгустками ультракоротких волновых импульсов.

2. В качестве механизма стабилизации размера электронного сгустка при его движении по ондулятору с ведущим магнитным полем может быть использован режим отрицательной массы, в котором эффективность источников, основанных на когерентном спонтанном излучении, значительно выше.

3. В источниках спонтанного когерентного циклотронного излучения коротких электронных сгустков, движущихся в однородном магнитном поле в режимах, близких к групповому синхронизму электронов с излучаемым волновым пакетом, может быть реализован эффект автокомпенсации кулоновского расталкивания в фазовом пространстве.

4. В случае относительно протяженных электронных сгустков возможна организация многоволновых режимов индуцированного ондуляторного и циклотронного излучения. В таких режимах компрессия или микрогруппировка в сгустке, обеспечиваемые низкочастотной волной, стимулируют генерацию высокочастотного волнового пакета.

5. Использование квазиоптического резонатора, основанного на эффекте Тальбо, позволяет обеспечить генерацию монохроматического излучения

в мощных длинноимпульсных ЛСЭ терагерцового диапазона. При этом в случае большой свехразмерности пространства взаимодействия возможно возбуждение релятивистским электронным пучком единственной супермоды указанного резонатора.

### **Основные результаты:**

1. Обнаружен и теоретически исследован эффект компрессии коротких электронных сгустков волновым полем, формирующимся в процесс когерентного спонтанного ондуляторного излучения сгустка в режимах, близких групповому синхронизму электронов с излучаемым ими волновым пакетом.

2. Описан процесс протяженного взаимодействия (генерации и последующего усиления) короткого электронного сгустка с одним циклом квазиуниполярного волнового импульса субтерагерцового частотного диапазона. Стабилизация размера сгустка полем излучения дает возможность генерации интенсивного импульса (с пиковой амплитудой электрического поля на уровне 100 МВ/м) с высоким (на уровне 20%) КПД отбора энергии электронов волной.

3. В качестве метода повышения эффективности источников, основанных на когерентном спонтанном ондуляторном излучении коротких электронных сгустков, предложено использовать движение частиц в режиме отрицательной массы, обеспечивающем стабилизацию размеров сгустков. В расчетах продемонстрирована возможность достижения высоких (30% и выше) значений КПД электронно-волнового взаимодействия в источниках волновых импульсов субтерагерцового частотного диапазона.

4. Предложен источник спонтанного когерентного циклотронного излучения коротких электронных сгустков, основанный на эффекте автокомпенсации кулоновского расталкивания в фазовом пространстве. Показано, что в режимах, близких к групповому синхронизму электронов с излучаемым ими волновым пакетом, увеличение длины сгустка из-за кулоновского расталкивания не приводит к увеличению фазового размера сгустка относительно излучаемой волны и, таким образом, не препятствует генерации волнового поля в высокоэффективном (с электронным КПД на уровне 10%) режиме когерентного спонтанного излучения.

5. Предложены и описаны высокоэффективные каскадные многоволновые механизмы ондуляторного и циклотронного излучения коротких электронных сгустков, в которых компрессия или микрогруппировка сгустков в поле генерируемого ими относительно длинноволнового излучения приводит к эффективному когерентному коротковолновому излучению. В частности, описан процесс захвата и адиабатического торможения высокочастотной волной электронного сгустка, скомпрессированного низкочастотным полем излучения, с электронным КПД на уровне 40%.

6. Предложена схема реализации мощного сильноточного электронного мазера, основанного на селективном возбуждении колебания с заданной про-

странственно-временной структурой (супермода Тальбо-типа) в относительно простой электродинамической системе с большой сверхразмерностью. Проведенные расчеты продемонстрировали возможность реализации МСЭ-генераторов терагерцового частотного диапазона с выходной мощностью на уровне нескольких ГВт.

7. Предложен метод разложения полей высокодобротных колебаний в резонаторах Тальбо-типа по набору собственных супермод системы. Показана возможность реализации ситуации, когда стартовый ток в электронном генераторе оказывается превышен только для одной (низшей) супермоды, что решает проблему конкуренции разных супермод, возбуждаемых электронным пучком на одной и той же частоте.

### **Список публикаций автора по теме диссертации**

[A1] Bandurkin I.V., Oparina Yu. S., Savilov A.V. Super-radiative self-compression of photo-injector electron bunches // Applied Physics Letters. 2017. 110 (26), 263508.

[A2] Oparina Yu. S., Savilov A.V. Coherent Super-Radiative Undulator Emission of Ultra-Short THz Wave Pulses// Physics of Plasmas. 2021. 28, 093302.

[A3] Oparina Yu. S., Savilov A.V. Spontaneous superradiant subTHz coherent cyclotron emission from a short dense electron bunch // Physical Review Accelerators and Beams. 2019. 22, 030701.

[A4] Bandurkin I.V, Oparina Yu. S., Osharin I.V., Savilov A.V. Spontaneous super-radiative cascade undulator emission from short dense electron bunches // Physics of Plasmas. 2019. 26, 113105.

[A5] Bratman V. L., Oparina Yu. S., Lurie Yu. Simultaneous High-Frequency Super-Radiance and Low-Frequency Coherent Spontaneous Radiation from Ultrarelativistic Electrons in a Waveguide // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res Sect. A. 2020. 976, № 164268.

[A6] Oparina Yu. S., Bratman V. L., Lurie Yu. Efficiency enhancement of THz radiation from an electron bunch in a waveguide due to low frequency stabilizing its length // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1697(1), 012058.

[A7] Oparina Yu. S., Peskov N. Yu., and Savilov A. V. Electron rf Oscillator Based on Self-Excitation of a Talbot-Type Supermode in an Oversized Cavity // Physical Review Applied. 2019. 12, 044070.

[A8] Oparina Yu. S., Savilov A. V., Shchegolkov D. Yu. Supermodes of oversized Talbot-type cavities // Journal of Applied Physics. 2020. 128 (11), № 114502.

[A9] Oparina Yu. S., Bratman V. L., Lurie Yu. Efficiency enhancement of THz radiation from an electron bunch in a waveguide due to low frequency stabilizing its length // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1697(1). 012058.

[A10] Bratman V., Lurie Yu., Oparina Yu., Savilov A. Capabilities of Terahertz Cyclotron and Undulator Radiation from Short Ultrarelativistic Electron Bunches // Instruments. 2019. 3. P. 55.

[A11] Glyavin M. Y., Oparina Yu. S., Savilov A.V., Sedov, A.S. Optimal parameters of gyrotrons with weak electron-wave interaction // *Physics of Plasmas*. 2016. 23 (9), 093108.

[A12] Bandurkin, I. V., Oparina Yu. S. Savilov, A.V. Super-radiative self-compression of photo-injector electron bunches and the use of this effect for realization of a THz source based on spontaneous coherent emission from a short dense electron bunch // *EPJ Web of Conferences*. 2017. 149. 05008.

[A13] Oparina Yu. S., Savilov A. V. Spontaneous coherent cyclotron THz super-radiation from a short dense photo-injector electron bunch // *EPJ Web of Conferences*. 2017. 149. 05019.

[A14] Savilov A. V., Bandurkin I. V., Bratman V. L., Kurakin I. S., Oparina Yu. S., Balal N., Lurie Yu. Axial and Phase Stabilization of Short Dense Photo-Injector Electron Bunches as a Way for Spontaneous Coherent THz Emission from These Bunches // *Workshop booklet of Abstracts, Terahertz science at European XFEL. 01–02 June 2017, European XFEL, Schenefeld, Germany*, p. 20.

[A15] Bandurkin I. V., Bratman V. L., Kurakin I. S., Oparina Yu. S., Savilov A. V., Balal N., Lurie Y. THz undulator radiation of dense electron bunches stabilized in the negative mass regime // *IVEC 2017 - 18th International Vacuum Electronics Conference 2018-January*, p. 1-2.

[A15] Oparina Yu. S., Savilov A.V. Spontaneous Coherent Cyclotron THz Super Radiation from a Dense Electron Bunch // *International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2018-September, Nagoya, Japan*. 8510387.

[A16] Bandurkin I. V., Bratman V. L., Kurakin I. S., Oparina Yu. S., Savilov A. V., Balal N., Lurie Y. THz radiation of stabilized dense electron bunches // *EPJ Web of Conferences*. 2018. 195, 01016.

[A17] Savilov A. V., Bandurkin I. V., Glyavin M. Y., Kalynov Y. K., Oparina Y. S., Osharin I. V., Zavolsky N. A., Highharmonic gyrotrons with irregular microwave systems // *EPJ Web of Conferences*. 2018. 195, 01015.

[A18] Oparina Yu. S., Savilov A. V., Pershin D. S., Bandurkin I. V. Selfcompression of dense photo-injector electron bunches // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 1135(1).012018.

[A19] Bandurkin I. V., Bratman V. L., Kurakin I. S., Oparina Yu. S., Savilov A. V., Balal N., Lurie Y. Terahertz Undulator Radiation of Stabilized Dense Electron Beams // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018. 82(12). P. 1587-1591.

[A20] Oparina Yu. S., Savilov A. V. Spontaneous Cyclotron Radiation of a Dense Electron Bunch // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018. 201882(12). P. 1600-1603.

[A21] Oparina Yu. S., Savilov A.V., Improvement of Mode Selectivity of High-Harmonic Gyrotron by Using Operating Cavities with Short Output Reflectors// *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2018. 39(7). P. 595-613.

[A22] Savilov A. V., Oparina Yu. S., Peskov N. Yu. Terahertz Free Electron Maser based on excitation of a Talbot-type super-mode in an oversized microwave system // 39th Free Electron Laser Conf, Hamburg, Germany, 2019-August.

[A23] Savilov A. V., Oparina Yu. S., Peskov N. Yu. Powerful Relativistic Oscillators of THz-band based on Excitation of Talbot-type Supermode in an Oversized Cavity // 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2019. 8874374.

[A24] Oparina Yu. S., Savilov A.V., Bandurkin I.V., Bratman V.L., Balal N., Lurie Yu., Spontaneous Coherent Radiation of Stabilized Dense Electron Bunches // 39th Free Electron Laser Conf, Hamburg, Germany, 2019-August.

[A25] Oparina Yu. S., Peskov N. Yu., Savilov A. V., Shchegolkov D. Yu. Electron masers based on excitation of Talbot-type supermodes // Proc. SPIE 11582, Fourth International Conference on Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection, and Applications, 115820I (17 November 2020).

[A26] Oparina Yu. S., Savilov A.V., Schegolkov D. Yu. Masers with selective excitation of Talbot-type supermode // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1697(1). 012059.

[A27] Bandurkin I. V., Bratman V. L., Oparina Yu. S., Savilov A. V., Lurie Yu. Mechanisms of stabilization and terahertz radiation of short dense electron bunches // Proc. SPIE 11582, Fourth International Conference on Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection, and Applications, 115820 (17 November 2020).

[A28] Опарина Ю. С., Савилов А.В., Песков Н.Ю. Источники мощного терагерцового излучения, основанные на когерентном спонтанном излучении электронных сгустков, формируемых фотоинжекторами // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 5-6, с. 422–429.

[A29] Oparina Yu. S., Savilov A.V. Spontaneous Coherent Super-Radiative Emission of Ultra-Short Terahertz Wave Pulse // IVEC 2021 – 22th International Vacuum Electronics Conference, 2021-April.

[A30] Oparina Yu. S., Peskov N. Yu. Savilov A.V. Free-Electron Masers Based on Excitation of Talbot-Type Supermodes // IVEC 2021 – 22th International Vacuum Electronics Conference, 2021-April.

[A31] Oparina Yu. S., Savilov A.V. Spontaneous Coherent Super-Radiative Emission of Ultra-Short Terahertz Wave Pulse // Proceedings of International Union of Radio Science General Assembly & Scientific Symposium, Rome, Italy, 2021.

[A32] Oparina Yu. S., Savilov A.V. Generation of ultrashort pulses in the THz frequency range // Journal of Physics: Conference Series, 2021.

[A33] Krygina D., Oparina Yu. S., Peskov N. Yu., Savilov A.V. Frequency Multiplication In Powerful THz-Band FEL Driven By Intense Relativistic Electron Beam // International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2021.

[A34] Bandurkin I. V., Martianov I., Oparina Yu. S., Savilov A.V., Krygina D., Peskov N. Yu.. Frequency Multiplication in Powerful THz-Band FEL Driven By Intense Relativistic Electron Beam // International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2021.

## Литература

[1] Гапонов А. В., Петелин М. И., Юлпатов В. К. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10, №.9–10. С. 1414.

[2] Релятивистская высокочастотная электроника. Сборник статей под редакцией А. В. Гапонова-Грехова. Горький : ИПФ АН СССР, 1979.

[3] Гапонов-Грехов А.В., Петелин М.И. Релятивистская высокочастотная электроника // Вест. АН СССР. 1979. №4. С. 11.

[4] Генераторы когерентного излучения на свободных электронах. Сборник статей. М. : Мир, 1983.

[5] Bratman V. L. et al. Common properties of free electron lasers // Optics Communications. 1979. 30(3). P. 409-412.

[6] Генераторы когерентного излучения на свободных электронах. Сборник статей. М. : Мир, 1983.

[7] Benford J., Swegle J. High-Power Microwaves. Norwood, MA: Artech House, 1992.

[8] Бугаев С. П., Канавец В. И., Кошелев В. И., Черепенин В. А. Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы. М : Наука, 1991.

[9] Thumm M. State-of-the-Art of High-Power Gyro-Devices and Free Electron Masers, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, 41 (1).

[10] Российская вакуумная СВЧ-электроника. Сборник статей под ред. М. И. Петелина. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2002.

[11] Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по СВЧ электронике для физиков. М. : Физматлит, 2003.

[12] Черепенин В. А. Релятивистские многоволновые генераторы и их возможные применения // УФН. 2006. 176 (10).

[13] Pellegrini C. et al. The physics of x-ray free-electron lasers // Reviews of Modern Physics. 2016. 88 (1). 015006.

[14] Ковалев Н. Ф. и др. Приборы типа "О", основанные на индуцированном черенковском и переходном излучении релятивистских электронов // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький : ИПФ АН СССР, 1979. С. 76.

[15] Бугаев С. П., Канавец В. И., Климов А. И. и др. Физические процессы в многоволновых черенковских генераторах // Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 5. Горький : ИПФ АН СССР, 1990. С. 78.

- [16] Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Сергеев А. С., Розенталь Р. М., Шпак В. Г., Яландин М. И., Фелпс А. Д. Р., Кросс А. В. Генерация субнаносекундных микроволновых импульсов на основе эффекта черенковского сверхизлучения // ЖТФ. 2002. Т. 72, вып. 3. С. 53-60.
- [17] Гинзбург Н. С., Зотова И. В., Сергеев А. С. Циклотронное сверхизлучение движущегося электронного сгустка в условиях группового синхронизма // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60, вып. 7. С. 501-506.
- [18] Sprangle P. Stimulated cyclotron resonance scattering and production of powerful submillimeter radiation // Appl. Phys. Lett. 1974. 25. P. 377.
- [19] Петелин М. И. К теории ультрарелятивистских мазеров на циклотронном авторезонансе // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17, №6. С. 902.
- [20] Bratman V. L., Moiseev M. A. Conditions for self-excitation of a cyclotron resonance maser with a nonresonant electrodynamic system // Radiophys. Quantum Electron., 1975. 17 (7).
- [21] Братман В. Л. и др. Циклотронные и синхротронные мазеры: материалы всесоюзного семинара «Релятивистская ВЧ электроника». Горький, сентябрь 1978 года.
- [22] Sprangle P. et al. Nonlinear Formulation and Efficiency Enhancement of Free-Electron // Phys. Rev. Lett. 1979. 43. P. 1932-1936.
- [23] Kroll N. M. et al. Free-electron lasers with variable parameter wigglers // IEEE J. Quantum Electron. 1981. 17. P. 1436.
- [24] Bratman V. L. et al. Simulations of the build-up of transverse and longitudinal structures of the microwave field in the Fusion FEM // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 1998. 407 (1-3), p. 40-44.
- [25] Antonsen T. M. et al. Mode competition and suppression in free electron laser oscillators // Physics of Fluids B. 1989. 1(5), p. 1097-1108.
- [26] Гинзбург Н. С., Сергеев А. С. Динамика ЛСЭ генераторов с резонаторами произвольной добротности // ЖТФ. 1991. Т. 61, вып. 6.
- [27] Gover A. et al. Time and Frequency Domain Analysis of Superradiant Coherent Synchrotron Radiation in a Waveguide Free-Electron Laser // Phys. Rev. Lett. 1994. vol. 72, p. 1192.
- [28] Bratman V. L., Savilov A. V. Competition of longitudinal modes and the scenario of single-mode regime build-up for the FOM-Fusion-FEM project // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A. 1995. 358. P. 182.
- [29] Knyazev B. A. et al. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements // Meas. Sci. Technol. 2010. 21 (5), p. 54017.
- [30] Vinokurov N. A. Free electron lasers as a high-power terahertz sources // J. Infrared, Millimeter THz Waves. 2011. 32, 1123.
- [31] Pellegrini C. et al. The physics of x-ray free-electron lasers // Rev. Mod. Phys. 2016. 88. P. 015006.
- [32] Ceccuzzi S. et al. Traditional vs. advanced Bragg reflectors for oversized circular waveguide // Fusion Engineering and Design. 2017. 123. P. 477.

- [33] Fomenkov I. et. al. Light sources for high-volume manufacturing EUV lithography: technology, performance, and power scaling// *Adv. Opt. Technol.* 2017. 6. no. 3-4. P. 173-186.
- [34] Yalandin M. I. et al. // *Proceedings of the IEEE.* 2004. 92. P. 1166-1178.
- [35] Akimov A. et al. Triple-pulse modulator for 20-MeV, 2-kA linear induction accelerator power supply// *Digest of Technical Papers-IEEE International Pulsed Power Conference.* 2015, art. no. 7296931.
- [36] Power J. G. Overview of photoinjectors // *AIP Conf. Proc.* 2010. 1299. 20.
- [37] Rosenzweig J. B. et al. Design and applications of an X-band hybrid photoinjector // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* 2011. 657. 107.
- [38] Bashmakov Y. A., Bondarenko T. V., Komarov D. A., Polozov S. M., et al. RF photogun and Cherenkov decelerating system for a high power radiation source in sub-mm region // *Problems of Atomic Science and Technology.* 2012. P. 92-95.
- [39] Logachev P. V. et al. LIU-2 linear induction accelerator// *Instruments and Experimental Techniques.* 2013. 56, 672.
- [40] Ginzburg N. S. et al. Tunable terahertz band planar Bragg reflectors // *Appl. Phys. Lett.* 2009. 95. 043504.
- [41] Ginzburg V. L. On radiation of microradiowaves and their absorption in air. *Akad. Nauk SSSR.* 1947, 11, 1651.
- [42] Motz H. Applications of the radiation from fast electron beams // *J. Appl. Phys.* 1951, 22, 527–535.
- [43] Talbot H.F. Facts relating to optical science No. IV, London, Edinburgh Philosophical Mag. Dec., 1836. *J. Sci.*, vol. 9, p.401-407.
- [44] Schneidmiller E. A. et al. Tunable IR/THz source for pump probe experiments at the European XFEL // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.* 2013. 8778. 877811.
- [45] Skorobogatiy M. et al. Statistical Models for Averaging of the Pump-Probe Traces: Example of Denoising in Terahertz Time-Domain Spectroscopy // *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology.* 2018. 8. p. 287.
- [46] Shayduk R. et al. Nanosecond laser pulse heating of a platinum surface studied by pump-probe X-ray diffraction// *Applied Physics Letters.* 2016. 109. 043107.
- [47] Balal N. et al. Negative-mass mitigation of Coulomb repulsion for terahertz undulator radiation of electron bunches // *Appl. Phys. Lett.* 2015. 107. P. 163505.
- [48] Tarakanov V. P. *User's Manual for Code KARAT.* 1992 .Berkley Research Associates (BRA), Springfield, VA.
- [49] Коломенский А. А., Лебедев А. Н. Авторезонансное движение частиц в поле плоской волны // *ДАН СССР.* 1962. 145. С. 1259–1261.
- [50] Давыдовский В. Я. Возможность ускорения заряженных частиц электромагнитными волнами в однородном магнитном поле // *Письма в ЖЭТФ* 1962. 43. С. 886–888.

ОПАРИНА Юлия Сергеевна

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ИМПУЛЬСНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ  
ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ  
ТЕРАГЕРЦОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 11.10.2021.  
Формат  $60 \times 90 \frac{1}{16}$ . Усл. печ. л. 1,75.  
Тираж 100 экз. Заказ № 46 (2021).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН  
603950, Н. Новгород, ул. Ульянова, 46