

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
ДИССЕРТАЦИИ**

«Методы повышения эффективности импульсных релятивистских электронных источников излучения терагерцового частотного диапазона»

Аспирант: Опарина Юлия Сергеевна

(подпись аспиранта)

Научный руководитель: Савилов Андрей Владимирович, д-р физ.-мат. наук, зав лаб. 112

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.03 Радиофизика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород
2021

Цели диссертации

1. Изучение особенностей процесса КСИ плотных фотоинжекторных электронных сгустков, динамики частиц в процессе излучения и возможных способов повышения эффективности, основанных на характерных для процесса КСИ особенностях.
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 высокооборотной моды типа Тальбо. Оценка эффективности генератора с электродинамической системой, параметры которой удовлетворяют всем этим условиям.
6. Изучение вопроса о конкуренции супермод типа Тальбо в системах с большой сверхразмерностью и возможностях обеспечения селективного возбуждения рабочей супермоды.
7. Разработка моделей для аналитических оценок и численного моделирования. Расчеты электронно-волнового взаимодействия в мощных сильноточных электронных лазерах терагерцового частотного диапазона, основанных на возбуждении супермод Тальбо-типа.

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 суб-ТГц 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 и многоволновые 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 – A26] опубликованы в реферируемых российских и зарубежных журналах и докладывались на 43-ей и 44-ой Международных конференциях по инфракрасным и миллиметровым волнам (Нагоя, Япония, 2018; Париж, Франция, 2019), 18-ой и 22-ой Международной конференции по вакуумной электронике (Лондон, Великобритания, 2017; Амстердам, Нидерланды, 2021), 47-ой Международной конференции по наукам о плазме (Сингапур, 2020), 39-ой международной конференции по лазерам на свободных электронах (Гамбург, Германия, 2019), Международных конференциях «ФизикаСПб 2018/2019/2020» (Санкт-Петербург, Россия, 2018-2020), 10-ом и 11-ом 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-ой 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 – A26] 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 «холодной» задачи формирования моды типа Тальбо и дальнейшем использовании этих результатов для расчёта проекта мощного сильноточного релятивистского МСЭ. 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.

Краткое содержание

В настоящее время растет интерес к созданию ВЧ-источников, работающих в ТГц и суб-ТГц диапазонах частот. Такие источники востребованы в различных приложениях. Например, для реализации терагерцового высокоградиентного ускорения [1], а также для исследования и контроля различных сред [2-5], включая эксперименты с накачкой-зондом («pump-probe» эксперименты) [6-8]. Мощные источники ТГц необходимы, например, для нагрева и обеспечения привода тока или диагностики в термоядерных установках нового поколения, таких как DEMO [9, 10]. Суб-ТГц излучение используется в качестве «короткопериодных» ондуляторов для коротковолновых лазеров на свободных электронах [11-13], а также в различных приложениях в физике плазмы [14-16].

Релятивистские электронные мазеры такие, как мазеры на циклотронном резонансе (МЦР) и лазеры/мазеры на свободных электронах (ЛСЭ/МСЭ), а также устройства, основанные на излучении Черенкова и Смита-Перселла [17-20], работающие в миллиметровом диапазоне длин волн, обычно основаны на возбуждении одной из собственных поперечных мод резонатора (волновода), далёкой от отсечки. Для решения проблемы селекции в качестве рабочей, как правило, используется низшая мода. В случае применения этого подхода для генерации субТГц-и ТГц-волн возникают проблемы. Очевидно, что рабочий волновод в этом случае должен быть достаточно широким, т. е. характерный поперечный размер должен быть намного больше длины рабочей волны. Это необходимо по ряду причин, а именно: транспортировка электронов, проблема пробоя поля мощного излучения внутри резонатора, омический нагрев стенок резонатора и др. В этой ситуации трудно обеспечить селективное возбуждение определенной поперечной моды. В таких сверхразмерных системах сразу несколько поперечных мод близки к резонансу с электронами. Это затрудняет обеспечение электронно-волнового взаимодействия только с одной модой [21-24]. Вторая проблема заключается в трудности обеспечения селективной одномодовой обратной связи в сверхразмерной системе. Приходится прибегать к специальным методам селекции рабочей моды. Здесь можно упомянуть возбуждение поверхностных волн в пространственно развитых волноводах с распределенной двумерной обратной связью [25, 26], использование двухволновых эффектов (включая умножение частоты) [27-30].

Для решения проблемы селекции можно использовать спонтанное когерентное излучение «специально «подготовленных» коротких электронных сгустков так же решает проблему селекции. Режим когерентного спонтанного излучения (КСИ) реализуется, когда фазовый размер электронного сгустка относительно излучаемой волны меньше 2π , то есть сгусток сгруппирован относительно излучаемой волны, так что частицы излучают квазисинфазно (см. **рис. 1 а**). В этом случае процесс генерации начнётся сразу, в отличие от случая индуцированного излучения, когда генерации должен предшествовать процесс микрогруппировки частиц (см. **рис. 1 б**).

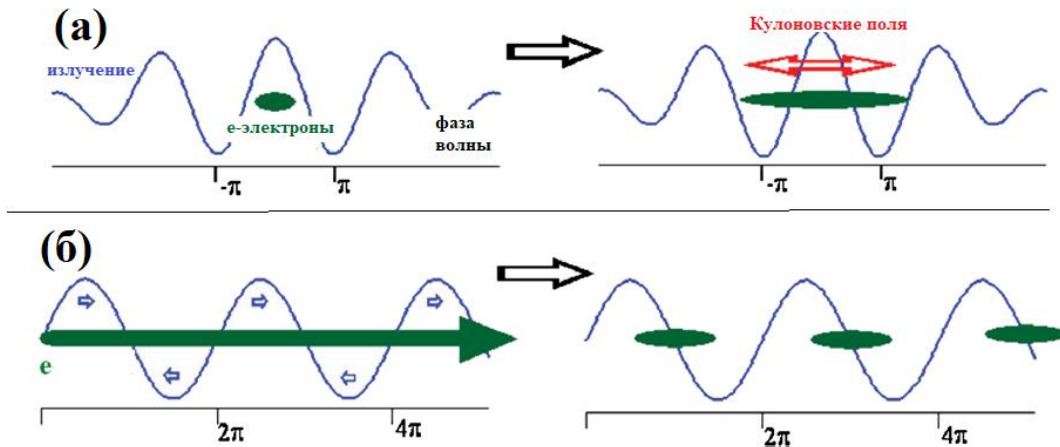


Рисунок 1. (а) схема спонтанного излучения; (б) схема индуцированного излучения.

Процесс КСИ в различных режимах стал одним из предметов исследований в данной работе. Были обнаружены интересные эффекты, связанные с особенностями динамики частиц в процессе КСИ. Например, компрессия собственными полями ондуляторного КСИ [A1], компенсация увеличения длины электронного сгустка вследствие кулоновского взаимодействия частиц в фазовом пространстве в случае циклотронного излучения [A2] частиц и др. Были предложены возможные приложения этих эффектов для повышения интенсивности электронно-волнового взаимодействия.

Другая идея решения обозначенной выше проблемы, предлагаемая в данной работе, заключается в том, чтобы отказаться от работы на фиксированной поперечной моде. Вместо этого мы предлагаем использовать супермоду, которая формируется фиксированным набором нескольких собственных поперечных мод сверхразмерного волновода. Предлагается использовать простой подход, основанный на использовании эффекта Тальбо [31], заключающегося в периодическое воспроизведение поперечной структуры волнового поля, образованного сложением парциальных поперечных мод с «правильными» фазами (см. **рис. 2 а**). Этот эффект широко используется в различных микроволновых схемах электронных мазеров и ускорителей [32-36]. Мы предлагаем использовать этот эффект для фиксации рабочей высокочастотной супермоды в простой микроволновой системе, состоящей из отрезка волновода, ограниченного двумя простыми зеркалами, см. **рис.2 б, в** [A3]

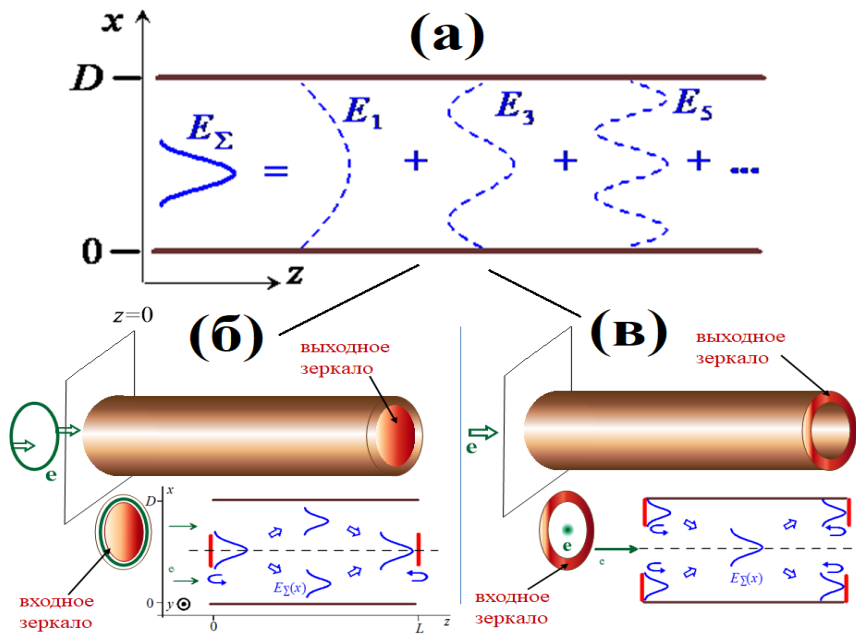


Рисунок 2. (а) схема формирования супермоды типа Тальбо. (б) и (в) две схемы резонаторов для возбуждения супермоды типа Тальбо.

Предпосылкой, обуславливающей возвращение к достаточно давно высказанной идее КСИ [37,38], стало развитие ускорителей, в первую очередь фотоинжекторных [39-42], где возможно формирование коротких плотных электронных сгустков с достаточно высокими плотностями заряда. Когерентное спонтанное излучение сгустков с начальными длительностями электронного импульса ~ 1 пс будет происходить в ТГц и суб-ТГц.

Очевидно, что, если сгусток изначально сгруппирован относительно излучаемой волны, излучение начнётся сразу, что является преимуществом режима КСИ по сравнению с режимом индуцированного излучения, которому должна предшествовать группировка частиц (сравните **рис. 1 а** и **б**). КСИ может быть реализовано в относительно простой электродинамической системе (не требующей цепи обратной связи и «затравочного» волнового сигнала). Фаза излучаемого в режиме КСИ волнового пакета фиксирована, что необходимо, например, для «pump-probe» экспериментов [43]. Можно обеспечить условия для относительной высокой эффективности электронно-волнового взаимодействия составляет ($\sim 10\%$ и даже выше [44,45]). При длине волны $\lambda \sim 1$ мм и длительности волнового импульса $\sim 5 - 7\lambda$ (~ 20 пс) в волноводе с площадью поперечного сечения $S_w \sim \pi\lambda^2$ усреднённая мощность излучения будет на уровне нескольких десятков МВт, что соответствует пиковому электрическому полю $E \sim 100$ МВ/м.

Серьёзный недостаток режима КСИ - его чувствительность к увеличению фазового размера электронного сгустка: если фазовый размер электронного сгустка превысит 2π , то излучение в спонтанном режиме прекратится. Для приборов с продольной группировкой частиц (ЛЭС/МСЭ, основанных на ондуляторном излучении, и в приборах черенковского типа) это эквивалентно тому, что для реализации излучения в режиме КСИ длина электронного сгустка должна быть меньше длины излучаемой волны $L_e < \lambda$ (**рис. 1 а**). В этом случае волновые пакеты, излучаемые электронами, складываются почти в фазе.

Итак, увеличение фазового размера сгустка ограничивает длительность и эффективность электронно-волнового взаимодействия. В частности, к увеличению фазового размера электронного сгустка может привести кулоновское взаимодействие частиц внутри сгустка. 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 $\sim 10\text{-}30$ см [46]. По этой причине в данной работе особое внимание уделяется возможным методам стабилизации фазового размера (длины) электронного сгустка.

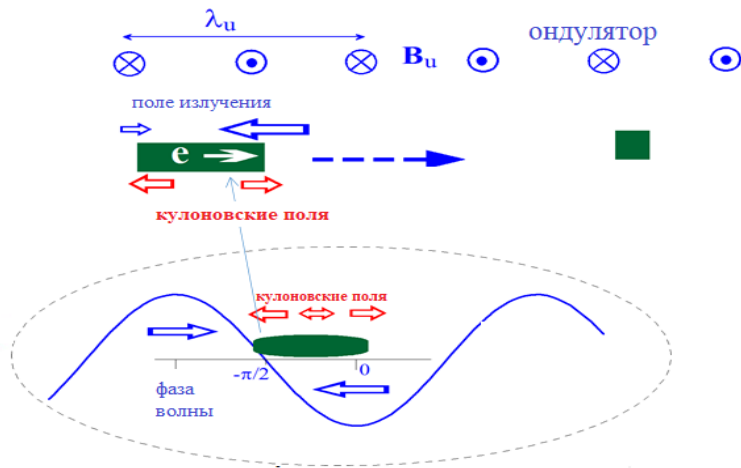


Рисунок 3. Схема компрессии собственными полями ондуляторного КСИ.

В случае ондуляторного КСИ эта проблема может быть решена за счёт эффекта компрессии собственными полями КСИ [А.1]. Обнаружение этого эффекта является важным результатом данной работы. Компрессия собственными полями КСИ имеет место благодаря «правильной» фазе электронного сгустка относительно излучаемой волны (**рис. 3**): электроны, летящие впереди, оказываются в максимуме тормозящей фазы, а электроны, летящие в «хвосте» электронного сгустка – в устойчивой нейтральной фазе, так что электронный сгусток будет «сжиматься» к своему краю. Такое положение фаз частиц относительно волны реализуется, если фазовый размер электронного сгустка $\sim \pi/2$ (**рис. 4**), в режиме группового синхронизма электронов с волной, если продольная скорость частиц близка к групповой скорости излучаемой волны. Режим группового синхронизма оптимален не только с точки зрения компрессии, но и с точки зрения излучения, поскольку в этом случае электронный сгусток не будет «проскальзывать» относительно максимума излучаемого импульса (сравните **рис. 4 а и б**) [46, 47, А2]. Данный эффект был проанализирован в двух различных приближениях и проверен 3D моделированием с помощью кода «KARAT» [А1] (см. **рис. 5**: рассматривалось излучение сгустка с начальной длиной 0.9 мм (3 пс), начальным радиусом 1 мм, энергией 3 МэВ, и полным зарядом 1 нК, в волноводе, помещённом в циркулярно поляризованный ондулятор, с параметром ондуляторности 0.7, диаметр волновода 6 мм, длина волны 1.8 мм). Этот код, основан на прямом «Particle-in-Cell» решении уравнений Максвелла [49], который широко используется для моделирования различных электронных приборов [50]. **Рис. 5 а** соответствует случаю точного группового синхронизма

(период ондулятора 6 см), а **рис. 5 б** соответствует режиму с достаточно большим «проскальзыванием» электронного сгустка относительно максимума излучаемого импульса (период ондулятора 5 см). Спустя менее, чем 10 нс, в режиме группового синхронизма линейная плотность увеличивается примерно в 2.5 раза, далее длина электронного сгустка «поддерживается» в пределах начальных. Без стабилизации собственными полями КСИ, через 6 нс длина электронного сгустка увеличивается более, чем в 4 раза.

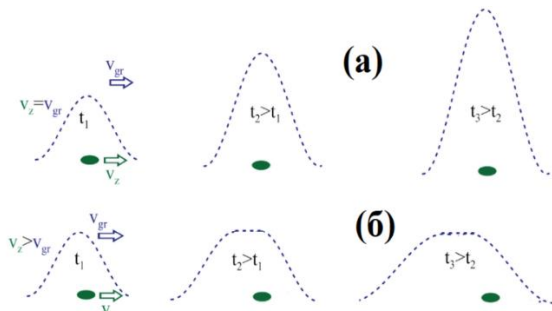


Рисунок 4. (а) форма огибающей импульса, излучаемого в режиме группового синхронизма; (б) излучаемый при наличии проскальзывания импульс.

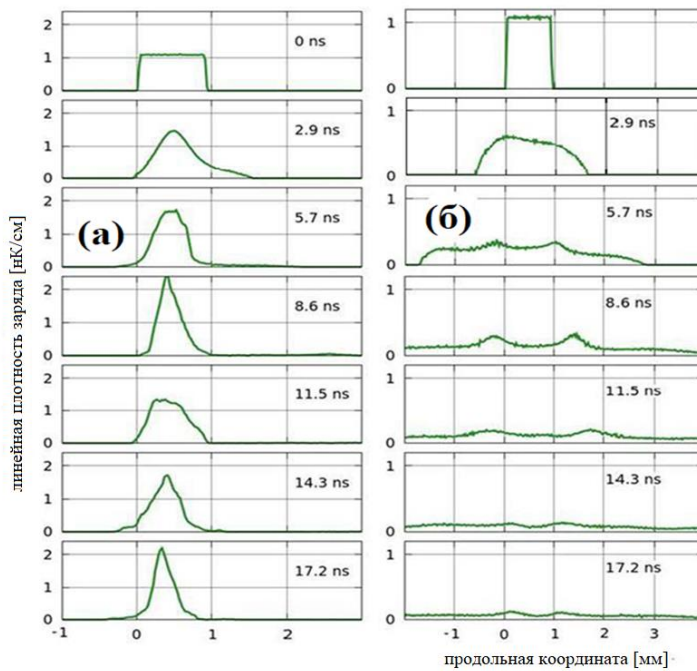


Рисунок 5. Динамика линейной плотности заряда в электронном сгустке в случае группового синхронизма (а) и при наличии проскальзывания (б).

Область параметров, оптимальных с точки зрения компрессии собственными полями КСИ, была проанализирована в приближении медленно меняющейся амплитуды огибающей волны (**рис. 6 а**). Для описания продольного кулоновского взаимодействия частиц внутри сгустка была использована модель сгустка в виде заряженных дисков [51]. Относительно высокая эффективность КСИ (на уровне 10%) в системах с «подходящими» параметрами обеспечивается в режиме группового синхронизма за счёт продольной стабилизации длины электронного сгустка и благодаря отсутствию «проскальзывания» электронного сгустка относительно максимума излучаемого импульса.

Более корректно в случае КСИ представление излучения в виде излучения набора макрочастиц. Фактически, в таком приближении волновое уравнение решается «напрямую», без введения медленной огибающей волнового импульса на фиксированной опорной частоте. Такое

приближение даёт возможность проанализировать структуры электрических полей излучаемых импульсов: электронный сгусток в процессе первого ондуляторного колебания излучает один цикл электромагнитной волны, длина которой соответствует доплеровский преобразованному периоду ондулятора, если групповая скорость излучаемого волнового пакета совпадает с поступательной скоростью электронов. На каждом из последующих ондуляторных периодов цикл усиливается, но из-за наличия дисперсии в системе энергия из этого центрального цикла, в области которого находится сгусток, рассеивается в соседние циклы (см. **рис. 6 б**). В соответствии с результатами численного моделирования амплитуды поля излучаемых импульсов на уровне нескольких десятков МВ/м (~50-100 МВ/м) с длительностями порядка нескольких десятков пс (см. **рис 7**).

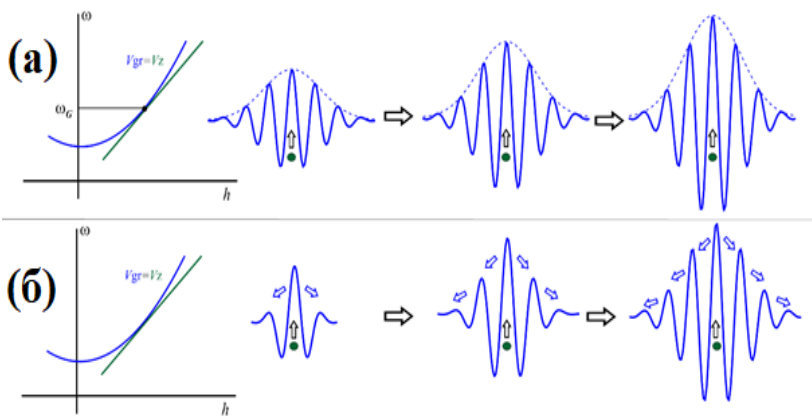


Рисунок 6. (а) – схема электронно-волнового взаимодействия в приближении медленно меняющейся амплитуды огибающей волнового импульса с фиксированной опорной частотой. (б) – формирование волнового пакета в режиме КСИ: усиление центрального цикла и перераспределение мощности по циклам вследствие дисперсии.

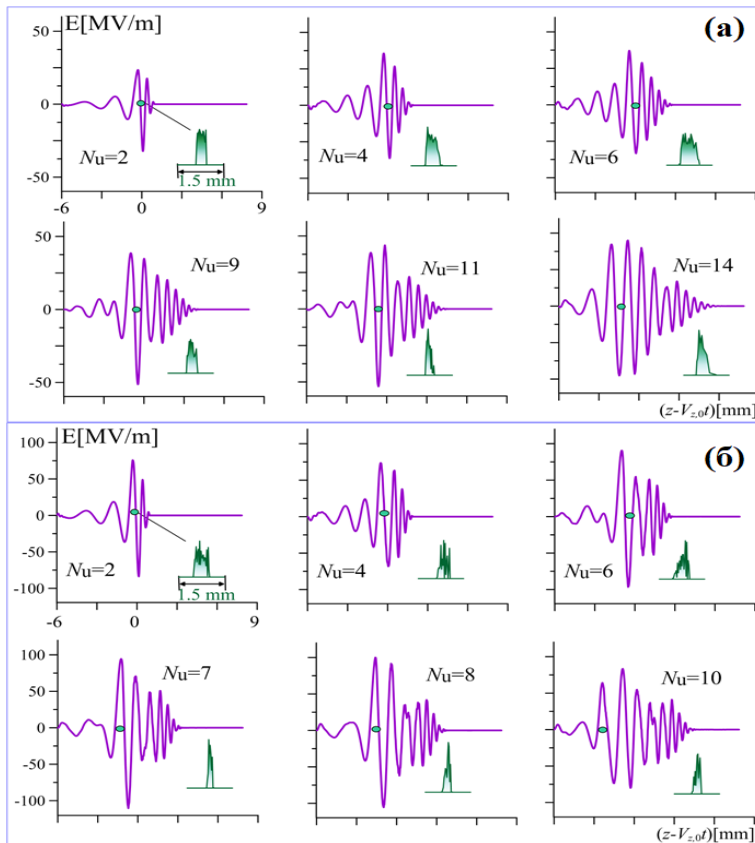


Рисунок 7.

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 нК (а) и 2 нК (б).

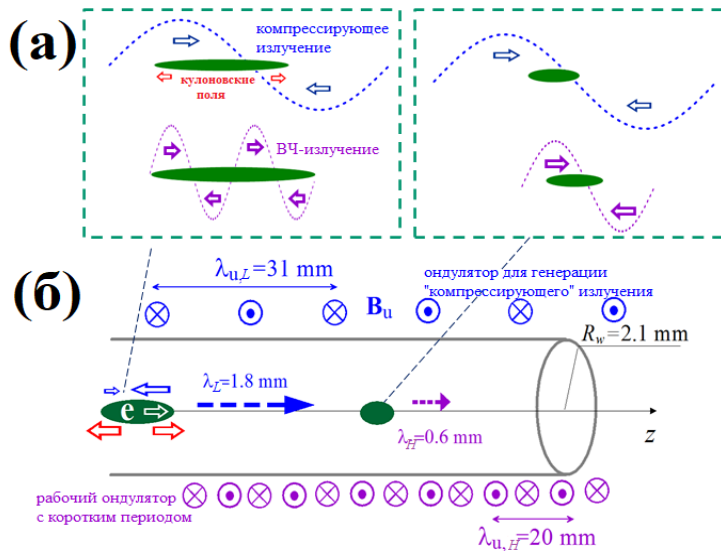


Рисунок 8.
Реализация схемы каскадного излучения в системе, включающей в себя два ондулятора

Предложено использовать эффект компрессии собственными полями КСИ в каскадной двухволновой схеме [A4]: сначала происходит КСИ относительно длинноволнового излучения, и сгусток компрессируется в его полях. Когда сгусток становится достаточно коротким, становится возможной генерация КСИ на более высокой частоте (**рис. 8**). Использование такой схемы позволяет обеспечить достаточно высокий КПД высокочастотного излучения. Например, эффективность излучения электронного сгустка с начальной энергией частиц 3 МэВ, с зарядом 0.3–1.0 нК, поперечный масштаб сгустка 2 мм, начальная длина сгустка $L_{e,0}=0.9$ мм (3 пс), в волноводе с радиусом $2R_w=4.2$ мм, помещённом периодические магнитные поля двух ондуляторов на частоте 0.5 ТГц составляет 10%. В системе с профилированием, благодаря обеспечению резонансного захвата частиц, можно добиться ещё более высокой эффективности излучения в такой схеме (эффективность может быть повышена в 3-5 раз, см. **рис. 9**) [A4].

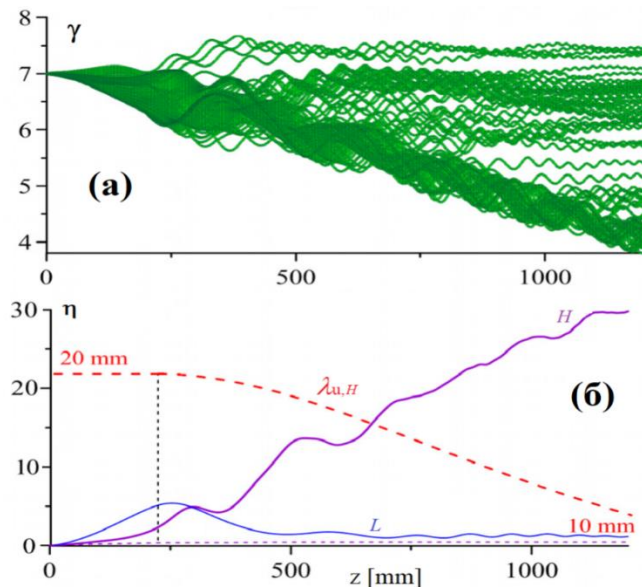


Рисунок 9.
Процесс двухволнового каскадного КСИ в системе с профилированием. Изменение энергий частиц (а), эффективность и закон профилирования периода ондулятора (б).

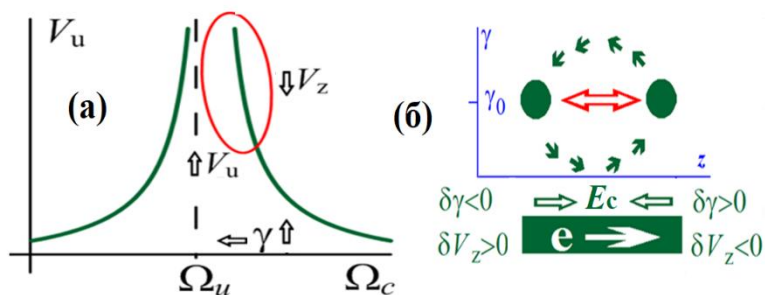


Рисунок 10. (а) зависимость поперечной скорости от частоты (энергии), (б) схема компрессии собственными кулоновскими полями.

Дополнительная продольная стабилизация электронного сгустка, может быть обеспечена в так называемом режиме отрицательной массы, который реализуется в ондуляторе с ведущим магнитным полем [50-52]. Если циклотронная частота колебаний $\Omega_c = eB_0/(mc\gamma)$ слегка превышает их баунс-частоту $\Omega_u = h_u V_z$, зависимость поперечной (осцилляционной) 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 (см. **рис. 10 а**). В такой ситуации кулоновское взаимодействие, очевидно, приведет не к увеличению длины сгустка, а к её сокращению (**рис. 10 б**). В соответствии с расчётами, эффективность излучения в режиме отрицательной массы при прочих равных условиях может быть повышена в 2-3 раза.

В случае циклотронного излучения группировка электронов по фазам относительно излучаемой волны носит двумерный характер, причем кулоновское взаимодействие частиц вносит противоположные по знакам возмущения в продольную и поперечную компоненты фазы (**рис. 11**). Важным результатом является доказательство 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]. Иначе говоря, стабилизация фазового размера реализуется автоматически.

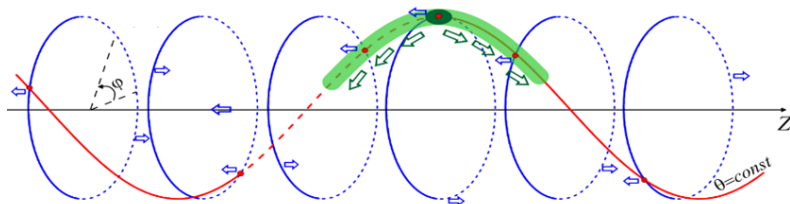


Рисунок 11. (а) одномерная и двумерная (б) группировки частиц по фазам относительно излучаемой волны.

Оказывается, что спонтанное относительно низкочастотное КСИ улучшает условия процесса микрогруппировки частиц в процессе относительно высокочастотного индуцированного излучения. Результаты более сложного трёхмерного моделирования, выполненного коллегами из университета г. Ариэль (Израиль) с помощью кода WB3D [52] для случая, когда частоты волн в процессе двухволновой генерации сильно отличаются и высокочастотному излучению должен предшествовать процесс микрогруппировки частиц, подтверждают качественные рассуждения, касающиеся улучшения условий микрогруппировки частиц за счёт низкочастотного КСИ и, как следствие, повышения эффективности высокочастотного индуцированного излучения. Так в

рассмотренном примере амплитуда электрического поля излучаемого импульса составила ~ 300 МВ/м, резонансная частота 6.3 ТГц [А5].

Ещё один метод повышения селективности, исследованный в данной работе, концептуально отличается от КСИ. 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, которую можно «запереть» в резонаторе, установив простые зеркала на входе и выходе [А3].

Предлагается проект, сильноточного мазера на свободных электронах (МСЭ), схема которого приведена на **рис. 2 б**. Результаты численного моделирования оказались очень привлекательными с точки зрения их возможной практической реализации. В случае тока, близкого к стартовому $I = 2$ кА, эффективность излучения в установившемся режиме составляет примерно 6%. Такая эффективность соответствует выходной мощности, близкой к 1 ГВт на частоте 2 ТГц (см. **рис. 14**).

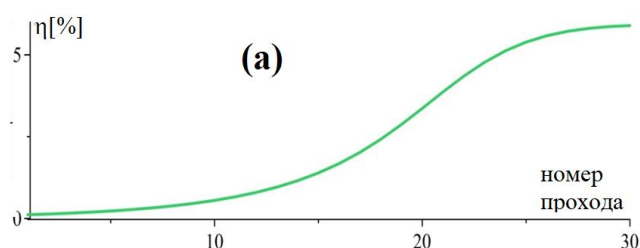
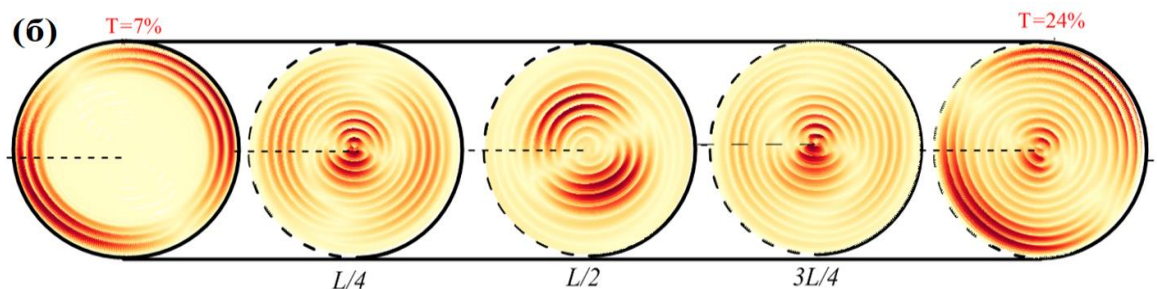


Рисунок 14.

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



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. В некотором смысле это аналогично представлению поля волновода как набора ортогональных поперечных мод, но структура супермод имеет принципиально многомерный (продольно-поперечный) характер. Важно, что разные супермоды имеют разную дифракционную добротность. Это связано с приближенным характером эффекта Тальбо. Благодаря этому можно найти диапазон параметров резонатора, в котором только одна низшая высокодобротная супермода может быть возбуждена рабочим электронным пучком [А6].

Положения, выносимые на защиту:

1. В процессе когерентного спонтанного ондуляторного излучения короткого (короче длины волны излучения) электронного сгустка может наблюдаться эффект компрессии этого сгустка собственными полями излучения. В режиме группового синхронизма, когда поступательная скорость электронов близка к групповой скорости излучаемого волнового пакета, фаза сгустка относительно волны такова, что в максимуме тормозящей фазы волны оказывается передний фронт сгустка, в то время как задний фронт располагается вблизи «нуля» волнового поля. Возникающий в результате эффект компрессии сгустка собственным полем излучения оказывается столь сильным, что может компенсировать кулоновское расталкивание частиц в электронных сгустках высокой плотности, формируемых в современных фотоинжекторах.
2. Эффект компрессии сгустка собственными полями излучения может быть использован для стабилизации размера электронного сгустка в процессе его движения по относительной протяженному пространству электронно-волнового взаимодействия в генераторе, основанном на когерентном спонтанном излучении такими сгустками ультракоротких волновых импульсов. В частности, может быть реализован процесс генерации и последующего усиления коротким (по сравнению с длиной волны излучения) сгустком одного «центрального» цикла ультракороткого (состоящего из нескольких циклов) волнового импульса. Секционирование рабочей электродинамической системы позволяет обеспечить высокий (10-20%) КПД электронно-волнового взаимодействия в таком процессе.
3. На основе эффекта компрессии электронного сгустка собственным полем спонтанного когерентного излучения возможна реализация двухволнового каскадного процесса когерентного спонтанного ондуляторного излучения. В таком процессе относительно протяженный (с длиной, заметно превышающей длину высокочастотной волны) электронный сгусток на первой стадии каскадного процесса формирует относительно низкочастотный волновой пакет и, одновременно, компрессируется в поле излучаемой волны. Сокращение длины сгустка дает возможность реализовать на второй стадии каскадного процесса спонтанное когерентное излучение высокочастотной волны. На этой стадии путем плавного профилирования параметров системы может быть организован высокоэффективный режим захвата высокочастотной волной и последующего торможения ею скомпрессированного электронного сгустка.
4. В качестве механизма стабилизации размера электронного сгустка при его движении по протяженному ондулятору может быть использован режим отрицательной массы. В таком режиме, который реализуется в ондуляторе с достаточно сильным ведущим магнитным полем, кулоновское взаимодействие приводит не к расталкиванию, а к притяжению электронов и, таким образом, может быть использовано для компрессии плотных электронных сгустков. Использование режима отрицательной массы позволяет существенно повысить эффективность

источников, основанного на когерентном спонтанном ондуляторном излучении коротких электронных сгустков.

5. В источниках спонтанного когерентного циклотронного излучения коротких электронных сгустков может быть реализован эффект автокомпенсации кулоновского расталкивания в фазовом пространстве.

Этот эффект имеет место в режимах, близких групповому синхронизму электронов с излучаемыми ими волновым пакетом. Эффект заключается в том, что увеличение длины сгустка из-за кулоновского взаимодействия не приводит к увеличению фазового размера сгустка относительно излучаемой им резонансной волны и, таким образом, не ведет к прекращению генерации волнового поля в высокоэффективном режиме когерентного спонтанного излучения.

6. В случае относительно протяженных электронных сгустков возможна организация многоволновых режимов индуцированного излучения. В таких режимах микрогруппировка в сгустке, наведенная вследствие излучения относительно низкочастотной волны, стимулирует генерацию высокочастотного волнового пакета.

7. Использование в качестве рабочего колебания электронного автогенератора высокочастотной супермоды типа Тальбо, образованной фиксированным набором парциальных поперечных волноводных мод, можно рассматривать в качестве концепции реализации мощных сильноточных релятивистских электронных мазеров со сверхразмерными электродинамическими системами. Важно, что такая супермода формируется в относительно простой электродинамической системе (волновод, ограниченный входным и выходным зеркалом), при этом собственная частота супермоды определяется геометрическими размерами волновода.

8. Существует набор ортогональных супермод, по которому может быть разложено волновое поле любой структуры, обладающее высокой добротностью (т.е. частично «запертое») в резонаторе Тальбо-типа. Поскольку разные супермоды обладают разными дифракционными добротностями, можно создать условия, при которых в рабочем резонаторе электронного генератора стартовый ток будет превышен лишь для одной супермоды. Таким образом, решается проблема конкуренции разных супермод Тальбо-типа, взаимодействующих с электронным пучком на близких частотах.

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 или волновым пакетом.

2. Предложено использовать эффект компрессии сгустка собственными полями излучения для стабилизации размеров электронных сгустков в генераторах, основанных на когерентном

спонтанном излучении такими сгустками ультракоротких волновых импульсов. В частности, описан процесс протяженного эффективного (с КПД на уровне 20%) взаимодействия (генерации и последующего усиления) короткого (по сравнению с длиной волны излучения) электронного сгустка с одним циклом интенсивного (с пиковой амплитудой электрического поля на уровне 100 МВ/метр) квазиуниполярного волнового импульса суб-терагерцового частотного диапазона.

3. В качестве метода повышения эффективности источников мощных импульсов электромагнитного излучения, основанных на когерентном спонтанном ондуляторном излучении коротких электронных сгустков, предложено использовать движение частиц в режиме отрицательной массы, в котором кулоновское взаимодействие приводит не к расталкиванию, а к притяжению электронов, что обеспечивает стабилизацию размеров электронных сгустков при их движении по протяженным ондуляторам. В расчетах продемонстрирована возможность достижения высоких (30% и выше) значений КПД электронно-волнового взаимодействия в работающих в таком режиме источниках когерентного спонтанного излучения волновых импульсов суб-терагерцового 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 групповому синхронизму электронов с излучаемым ими волновым пакетом, увеличение длины электронного сгустка из-за кулоновского расталкивания не приводит к увеличению фазового размера сгустка относительно излучаемой им резонансной 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 лазера, работающего в терагерцовом частотном диапазоне, основанного на селективном возбуждении колебания с заданной пространственно-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 описания собственных высокочастотных колебаний (супермод) в резонаторах Гальбо-типа, основанный на разложении волновых полей по набору взаимно ортогональных супермод. Показано, что при определенных условиях может быть реализована ситуация, 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

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

[A2] 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.

[A3] 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.

[A4] Bandurkin I.V., Oparina Yu.S., Osharin I.V. and 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 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2020. 976, № 164268.

[A6] Oparina Yu.S., Savilov A.V., Shchegolkov D.Yu., Supermodes of oversized Talbot-type cavities // Journal of Applied Physics. 2020. 128 (11), p. 114502.

[A7] 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 149, 05008, 2017.

[A8] Oparina Yu.S., Savilov A.V., Spontaneous coherent cyclotron THz super-radiation from a short dense photo-injector electron bunch // EPJ Web of Conferences 149, 05019, 2017.

[A9] A. V. Savilov, I. V. Bandurkin, V. L. Bratman, I.S. Kurakin, Yu.S. Oparina, N.Balal, and Yu. Lurie. 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, page 20.

[A10] 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, pp. 1-2 DOI: 10.1109/IVEC.2017.8289616

- [A11] 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, 8510387.
- [A12] 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.
- [A13] Savilov, A.V., Bandurkin, I.V., Glyavin, M.Y., Kalynov, Y.K., Oparina Yu.S., Osharin, I.V., Zavolsky, N.A., Highharmonic gyrotrons with irregular microwave systems // EPJ Web of Conferences. 2018. 195, 01015.
- [A14] 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.
- [A15] 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). pp. 1587-1591.
- [A16] Oparina Yu.S., Savilov A.V. Spontaneous Cyclotron Radiation of a Dense Electron Bunch // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 201882(12). pp. 1600-1603.
- [A17] 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, doi:10.18429/JACoW-FEL2019-THP024.
- [A18] Andrey V. Savilov, Yulia S. Oparina, Nikolai Yu. Peskov, Powerful Relativistic Oscillators of THz-band based on Excitation of Talbot-type Supermode in an Oversized Cavity, 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874374.
- [A19] Oparina Yu.S., Savilov A.V., Bandurkin I.V., Bratman V.L., Balal N., Lurie Yu., Spontaneous Coherent Radiation of Stabilized Dense Electron Bunches, doi:10.18429/JACoW-FEL2019-THP024
- [A20] Bratman Vladimir, Lurie Yuri, Oparina Yuliya and Savilov Andrey, Capabilities of Terahertz Cyclotron and Undulator Radiation from Short Ultrarelativistic Electron Bunches // Instruments 2019. 3. p. 55.
- [A21] Oparina Yu.S., Pershin D.S., Spontaneous coherent cyclotron emission from photoinjector electron bunches: superradiation and two-frequency regime // Journal of Physics: Conference Series, 2019. 1400(4). p. 044007
- [A22] 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.
- [A23] 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
- [A24] 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).

[A25] 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, 115820Y (17 November 2020).

[A.26] 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 63(5-6), с. 422–429

Список цитируемой литературы

- [1] Nanni E.A. et al. Terahertz-driven linear electron acceleration // Nature Communications. 2015. vol 6, p. 8486.
- [2] Marsik P. et al. Terahertz ellipsometry study of the soft mode behavior in ultrathin SrTiO₃ films // Applied Physics Letters. 2016. 108, p. 052901.
- [3] Blaga C.I. et al. Strong-field photoionization revisited // Nat. Phys. 2009. vol. 5, p. 335.
- [4] Liu M. et al. Terahertz-field-induced insulator-to-metal transition in vanadium dioxide metamaterial // Nature. 2012. 487. p. 345.
- [5] Mics Z. et al. Thermodynamic picture of ultrafast charge transport in graphene // Nat. Commun. 2015. 6. p.1.
- [6] Zalden P. et al. Picosecond electric field induced threshold switching in phase-change materials // Phys. Rev. Lett. 2016. 117, p. 67601.
- [7] Kubacka T. et al. Large-amplitude spin dynamics driven by a THz pulse in resonance with an electromagnon // Science. 2014. 343. p. 1333.
- [8] Bonetti S. et al. THz-Driven Ultrafast Spin-Lattice Scattering in Amorphous Metallic Ferromagnets. // Phys. Rev. Lett. 2016. 117. p. 87205.
- [9] Helm M. et al. All-THz pump-probe spectroscopy of the intersubband AC-Stark effect in a wide GaAs quantum well. Optics Express. 2020 vol 28, p. 25358, 2020.
- [10] Wenninger R. et al. Advances in the physics basis for the European DEMO design // Nuclear Fusion. 2015. 55. 063003.
- [11] Garavaglia S. et al. EU DEMO EC system preliminary conceptual design // Fusion Engineering and Design. 2018. 136. 1173.
- [12] Tran T.M., B.G. Danly, J.S. Wurtele, Free-Electron Lasers with Electromagnetic Standing Wave Wigglers, IEEE Journal of Quantum Electronics 23, 1578 (1987).
- [13] Tantawi S. et al. Dunning, Experimental demonstration of a tunable microwave undulator // Physical Review Letters. 2014. 112. 164802.
- [14] Kuzikov S.V. et al. Flying radio frequency undulator // Applied Physics Letters. 2014. 105. 033504.
- [15] Nusinovich G.S. et al. On the sensitivity of terahertz gyrotron based systems for remote detection of concealed radioactive materials // Journal of Applied Physics. 2012. 111. 124912.
- [16] Glyavin M. Y. et al. A point-like source of extreme ultraviolet radiation based on a discharge in a non-uniform gas flow, sustained by powerful gyrotron radiation of terahertz frequency band // Applied Physics Letters. 2014 105. 4900751.
- [17] Abramov I.S. et al. Extreme-Ultraviolet Light Source for Lithography Based on an Expanding Jet of Dense Xenon Plasma Supported by Microwaves // Physical Review Applied. 2018. 10. 034065.

- [18] Chen C. et al. A repetitive X-band relativistic backward-wave oscillator // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2002. 30. 1108.
- [19] Korovin S.D. et al. Generation of Cherenkov superradiance pulses with a peak power exceeding the power of the driving short electron beam // *Physical Review E*. 2006. 74. 016501.
- [20] Xiao R. et al. Efficiency enhancement of a high power microwave generator based on a relativistic backward wave oscillator with a resonant reflector // *Journal of Applied Physics*. 2009. 105. 053306.
- [21] Rostov V.V., I.V. Romanchenko et al. Superradiant Ka-band Cherenkov oscillator with 2-GW peak power // *Physics of Plasmas*. 2016. 23. 093103.
- [22] Bratman V.L., Savilov A.V. Nonresonant excitation and nonlinear suppression of parasitic transverse modes in free-electron masers// *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1993. 14. 2119.
- [23] Bratman V.L., Savilov A.V. Simulations of the build-up of transverse and longitudinal structures of the microwave field in the Fusion FEM // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*. 1998. 407. p. 40.
- [24] Zhang D. et al. Analysis of the mode composition of an X-band overmoded O-type Cerenkov high-power microwave oscillator// *Physics of Plasmas*. 2012. 19. 103102.
- [25] Xiao R. et al. An overmoded relativistic backward wave oscillator with efficient dual-mode operation // *Applied Physics Letters*. 2014. 104. 093505.
- [26] Cross A.W. et al. Experimental studies of two-dimensional coaxial Bragg structures for a high-power free-electron maser// *Applied Physics Letters*. 2002. 80. 1517.
- [27] MacLachlan A.J. et al. Resonant Excitation of Volume and Surface Fields on Complex Electrodynamic Surfaces// *Physical Review Applied*. 2019. 11. 034034.
- [28] Bratman V.L. et al. Effective co-generation of opposite and forward waves in cyclotron-resonance masers// *Physical Review Letters*. 2000. 85. 3424.
- [29] Savilov A.V. Cyclotron frequency multiplication in cherenkov backward-wave oscillators// *Physics of Plasmas* 16, 063103 (2009).
- [30] Peskov N.Yu. et al. High-power free-electron maser operated in a two-mode frequency-multiplying regime// *Physical Review Accelerators and Beams*. 2016. 19. 060704.
- [31] Liu W. et al. Multicolor Terahertz Frequency Mixer Using Multibunching of Free-Electron Beams// *Physical Review Applied*. 2018. 10. 034031.
- [32] Talbot H.F., "Facts relating to optical science No. IV" London, *Edinburgh Philosophical Mag., J. Sci.*, vol.9, pp.401-407, Dec., 1836.
- [33] Rivlin L.A., Shil'dyaev V.S, Polyharmonic waveguide for coherent light, *Radiophysics and Quantum Electronics*, April 1968, Volume 11, Issue 4, pp 318- 321.
- [34] Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Shmelyov M.Yu. Microwave Systems Based on the Effect of Image Multiplication in Oversized Waveguides// *Digest of 18 Int. Conf. on IR and MM Waves, Colchester, UK*. 1993. p. 485.
- [35] Kuzikov S.V. Wavebeam multiplication phenomena to RF power distribution systems of high-energy linear accelerators// *Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1998. 19. 1523.
- [36] Marks H.S. and Gover A. Talbot Effect mm-Wave Resonator for an Electrostatic Accelerator Free Electron Laser// *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2018. 66. 3.

- [37] Ginzburg, V.L. On radiation of microradiowaves and their absorption in air. Akad. Nauk SSSR 1947, 11, 1651
- [38] Motz, H. Applications of the radiation from fast electron beams // J. Appl. Phys. 1951, 22, 527–535.
- [39] Liu B. et al. “Generation of narrowband, high-intensity,” carrier-envelope phase-stable pulses tunable between 4 and 18 THz // Optics Letters. 2017. 42. 129.
- [40] Power J. G. Overview of photoinjectors// AIP Conf. Proc. 2010. 1299. 20.
- [41] Rosenzweig J. B. et al. Design and applications of an X-band hybrid photoinjector// Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2011. 657. 107.
- [42] Dunham B. et al. Record high-average current from a high-brightness photoinjector// Appl. Phys. Lett. 2013.102. 034105.
- [43] Gulliford C. et al. Demonstration of cathode emittance dominated high bunch charge beams in a DC gun-based photoinjector// Appl. Phys. Lett. 2015. 106. 094101.
- [44] Bandurkin, I.V., Osharin, I.V., Savilov, A.V. Cyclotron radiation cooling of a short electron bunch kicked in an undulator with guiding magnetic field. // Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams. 2015. 18 (11). 110702.
- [45] Balal N. et al. Negative-mass mitigation of coulomb repulsion for terahertz undulator radiation of electron bunches// Appl. Phys. Lett. 2015. 107. p. 163505.
- [46] Ginzburg, N.S., Peskov, N.Y., “Nonlinear theory of a free electron laser with a helical wiggler and an axial guide magnetic field”(2013) Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 16 (9), 090701, DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.16.090701
- [47] Freund, H.P., Antonsen, T.M. (1996) Principles of Free-Electron Lasers. (Chapman & Hall, London)
- [48] Tarakanov, V.P.(1992) User's Manual for Code KARAT. (Berkley Research Associates (BRA), Springfield, VA)
- [49] Xiao R., Chen C., Sun J., Zhang X., and Zhang L. //Appl. Phys. Lett. 2011. 98. 101502.
- [50] Bandurkin I. V., Kurakin I. S., Savilov A. V. Compression of a photoinjector electron bunch in the negativemass undulator// Phys. Rev. Accel. Beams. 2017. 20, p. 020704.
- [51] Pinhasi, Y., Lurie, Y., Yahalom, A. Model and simulation of wide-band interaction in free-electron lasers// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2001. 475 (1-3). p. 147-152.