

На правах рукописи

Железнов Илья Владимирович

**КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
СТИМУЛИРОВАННОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ И СГУСТКОВ
В СВЕРХРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

01.04.03 – радиофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2018

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

Научный руководитель: Гинзбург Наум Самуилович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН «Институт прикладной физики РАН» (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты: Аржанников Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН «ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН» (г. Новосибирск).

Куркин Семен Андреевич, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «СГТУ им. Ю.А. Гагарина» (г. Саратов).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук» (г. Томск).

Защита состоится « 17 » декабря 2018 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д002.069.02 при ФГБУН «Институт прикладной физики РАН» по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Институт прикладной физики РАН.

Автореферат разослан « 10 » ноября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,



Э.Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Формулировка и актуальность проблемы

Стимулированное черенковское излучение релятивистских электронных потоков в периодически-гофрированных волноводах широко используется в релятивистской электронике для создания генераторов и усилителей субгигаваттного и гигаваттного уровня мощности в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн [1-10]. Предшествующие теоретические модели таких приборов [10-17], как правило, основаны на теории возбуждения волноводов [13,17]. Согласно этой теории поле излучения может быть представлено в виде волноводной моды, которая, при распространении в периодической структуре, в соответствии с теоремой Флоке, представляется в виде суммы пространственных гармоник [18]. Прямолинейно движущийся электронный пучок взаимодействует с одной из этих гармоник в условиях синхронизма черенковского типа: $\omega = (h + n\hbar)v$, где v – поступательная скорость частиц, ω – частота излучения, h – продольное волновое число основной гармоники, $\hbar = 2\pi / d$, d – период структуры, n – номер синхронной пространственной гармоники.

Вместе с тем, в последнее время становится актуальной задача освоения на высоком (мультигигаваттном) уровне мощности коротковолновых, в частности, субмиллиметрового диапазонов. Это неизбежно требует использования сверхразмерных или открытых электродинамических систем, включая приборы черенковского типа. В этом случае эффективны квазиоптические методы описания электронно-волнового взаимодействия [19]. Применительно к релятивистским черенковским генераторам и усилителям подобный подход развивается в работах [19,1а-13а], в которых исследовано возбуждение электронными пучками поверхностных волн, распространяющихся над гофрированными металлическими структурами. При этом квазиоптическое приближение достаточно полно описывает процессы электронно-волнового взаимодействия в случае релятивистских электронных пучков, когда для организации взаимодействия черенковского типа требуется относительно небольшое замедление волны.

В рамках квазиоптического подхода значительный интерес представляет импедансное приближение, позволяющее существенно упростить анализ процессов электронно-волнового взаимодействия в условиях, когда частота излучения далека от брэгговских резонансов. В этих условиях все пространственные гармоники, кроме основной, имеют фиксированную структуру поля, соответствующую медленным поверхностным волнам, а амплитуды этих гармоник выражаются через амплитуду основной гармоники алгебраически. В силу того, что пространственные гармоники обладают пренебрежимо малыми потоками мощности, поле излучения имеет практически однонаправленный поток энергии. При этом если вектор Пойнтинга указанного волнового пучка сонаправлен с поступательной скоростью

электронов, то реализуются усилительные схемы типа ЛБВ. В альтернативном варианте, когда вектор Пойнтинга направлен навстречу поступательному движению частиц, могут быть реализованы генераторные схемы типа традиционной одномодовой ЛОВ или ЛОВ на поверхностной волне.

Следует отметить, что импедансное приближение, развитию которого посвящена **первая глава** диссертационной работы, широко применяется в прикладной электродинамике [20] и релятивистской электронике [21]. Указанное приближение основано на использовании импедансных граничных условий (ИГУ), которые задают отношение тангенциальных компонент электрического и магнитного полей на определенном образом выбираемой поверхности. Постановка ИГУ позволяет упростить ряд задач электродинамики посредством исключения из анализа распространения и возбуждения волн заранее определенного поля вне области, ограниченной импедансной поверхностью. К таким задачам относятся не только исследование распространения волн над гофрированными поверхностями идеальных проводников, но и многие другие. В частности, импедансными являются граничные условия Леонтовича, выполняющиеся на поверхности металла с конечной проводимостью [18]. При определенных условиях ИГУ также могут быть записаны на границе раздела плазма–вакуум [22, 23].

В большинстве перечисленных случаев над импедансными поверхностями происходит формирование медленных поверхностных волн, которые могут синхронно взаимодействовать с релятивистскими электронными потоками. На этой основе может быть обеспечено эффективное усиление излучения. Анализ усилителей поверхностных волн представляет собой актуальную радиофизическую задачу. Как показано в настоящей работе, он может быть проведен в рамках универсальной (с точностью до определения импеданса) квазиоптической модели. В таком приближении в работе строятся линейная и нелинейная теории коротковолновых усилителей, основанных на стимулированном излучении РЭП над гофрированными поверхностями, а также на эффектах резистивной [24, 25] и плазменно-пучковой [26] неустойчивостей.

Поскольку большинство характерных масштабов изменения амплитуды электромагнитного поля и электродинамических систем изменяются пропорционально длине волны излучения, характерные оптимальные толщины электронных пучков и их расстояния от импедансной поверхности при переходе в коротковолновые диапазоны существенно уменьшаются. Соответственно, последовательный учет полей пространственного заряда электронных потоков в рамках квазиоптической теории является актуальной задачей.

В условиях, когда частота близка к брэгговскому резонансу ($k, h \approx \bar{h} / 2$, $k = \omega / c$), из топологии дисперсионных характеристик нормальных волн в сверхразмерных гофрированных волноводах следует, что поле излучения может быть представлено в виде двух встречных волновых пучков, которые

имеют противоположно направленные потоки энергии. При анализе возбуждения ВЧ полей релятивистскими электронными потоками в указанных условиях наибольший интерес представляет исследование генераторных режимов, актуальность теоретического анализа которых в том числе обусловлена наличием большого числа экспериментальных реализаций генераторов подобного типа, называемых также генераторами колебаний π -вида или многоволновыми черенковскими генераторами (МВЧГ) [5]. Релятивистские генераторы поверхностной волны имеют пространство взаимодействия в виде сверхразмерных цилиндрических волноводов, запитываемых РЭП трубчатой геометрии. В то же время предшествующий анализ генераторов поверхностной волны на основе квазиоптического приближения проводится в рамках упрощенной планарной модели [19]. Соответственно, актуальной задачей, которой посвящена **вторая глава** диссертации, является исследование характеристик генераторов поверхностной волны с учетом кривизны поверхности цилиндрического сверхразмерного волновода, что позволяет провести более точное сравнение с известными экспериментальными результатами. Кроме того, на этой основе может быть проведено теоретическое исследование и обоснована возможность эффективной работы генераторов поверхностной волны цилиндрической геометрии в коротковолновых диапазонах вплоть до субмиллиметрового.

Еще одной актуальной задачей релятивистской электроники является исследование генерации ультракоротких импульсов большой мощности на основе эффекта сверхизлучения (СИ) протяженных электронных пучков с характерными длинами порядка длины когерентности. Последняя в типичных случаях не превышает 10-15 длин волн излучения [27,28]. К настоящему времени наибольшая пиковая мощность ультракоротких импульсов СИ (до 1 ГВт в 8-ми миллиметровом диапазоне и до 3 ГВт в 3-х сантиметровом диапазоне) получена на основе черенковского механизма излучения в режиме возбуждения обратной волны [28]. В указанных экспериментах использовались гофрированные волноводы с малым фактором сверхразмерности, в которых диаметр волновода был порядка длины волны. Соответственно, укорочение длины волны излучения при сохранении фактора сверхразмерности неизбежно приводило к резкому снижению мощности генерируемых импульсов СИ, как вследствие повышения доли омических потерь, так и проблем с транспортировкой пучка. В результате в диапазоне 2-4 мм пиковая мощность импульсов СИ снижалась до 5-10 МВт [27]. В **третьей главе** диссертации развивается квазиоптическая теория генераторов импульсов черенковского СИ, основанных на возбуждении поверхностных волн в сверхразмерных гофрированных цилиндрических волноводах. На основе указанной теории проведено моделирование и разработан экспериментальный макет генератора СИ, в котором в диапазоне 140 ГГц наблюдалась генерация субнаносекундных импульсов с рекордной пиковой мощностью до 70 МВт.

Цели диссертационной работы, исходя из перечисленных выше актуальных проблем, можно сформулировать следующим образом:

1. Анализ возможности использования импедансных граничных условий для описания распространения электромагнитных волн над различными поверхностями, включая поверхность идеального металла с периодической гофрировкой, поверхность металла с конечной проводимостью, границу раздела плазма–вакуум.

2. Построение универсальной квазиоптической теории релятивистских черенковских усилителей поверхностной волны (как линейной, так и нелинейной), основанной на использовании импедансных граничных условий. Последовательный учет полей пространственного заряда модулированного электронного потока.

3. Развитие квазиоптической теории черенковских генераторов поверхностной волны, основанных на возбуждении поверхностных волн релятивистскими электронными пучками в периодически гофрированных сверхразмерных цилиндрических волноводах. Сопоставление результатов моделирования с известными экспериментальными данными. Оценка возможности продвижения релятивистских черенковских генераторов поверхностной волны в коротковолновые диапазоны.

4. Моделирование процессов черенковского сверхизлучения протяженных электронных сгустков в сверхразмерных периодически гофрированных волноводах. Создание теоретической базы для проведения экспериментов по генерации субнаносекундных импульсов СИ в режиме возбуждения поверхностных волн в коротковолновой части миллиметрового диапазона.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Усиление волн релятивистскими электронными пучками, движущимися прямолинейно над импедансными поверхностями, может быть описано в рамках универсальной квазиоптической модели. В приближении малого сигнала с учетом высокочастотных полей пространственного заряда может быть получено универсальное с точностью до определения импеданса дисперсионное уравнение, которое позволяет оценить инкременты конвективной неустойчивости в различных режимах. Описание распространения волны на основе параболического уравнения в совокупности с усредненными уравнениями движения электронов позволяет определить эффективность энергообмена, уровень омических потерь, пространственную структуру поля на выходе из области взаимодействия.

2. Резистивная неустойчивость, развивающаяся при движении релятивистских электронных потоков над металлами с конечной проводимостью, может быть использована для усиления коротковолнового (субмиллиметрового) излучения. Анализ в рамках квазиоптической теории с граничными

условиями Леонтовича над поверхностью металла позволяет определить инкременты неустойчивости, волновой и электронный КПД.

3. Квазиоптическая модель генераторов поверхностной волны на основе сверхразмерных гофрированных цилиндрических волноводов позволяет адекватно описать эксперименты по генерации гигаваттного излучения, проведенные ранее в сантиметровом диапазоне длин волн, и показывает возможность реализации указанного типа генераторов в субмиллиметровом диапазоне с высоким уровнем мощности порядка 100 МВт.

4. Эффект возбуждения поверхностных волн протяженными электронными сгустками, движущимися в сверхразмерных гофрированных цилиндрических волноводах, может быть использован для генерации субнаносекундных импульсов сверхизлучения высокой (субгигаваттной) пиковой мощности в коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Научная новизна:

1. Развита универсальная квазиоптическая модель, описывающая усиление коротковолнового излучения релятивистскими электронными пучками, движущимися над различными импедансными поверхностями, включая поверхности идеального металла с периодической гофрировкой, металла с конечной проводимостью и полуограниченной изотропной плазмы.

2. Исследовано влияние полей высокочастотного пространственного заряда на структуру возбуждаемых поверхностных волн и инкременты неустойчивости.

3. Построена квазиоптическая модель генераторов поверхностной волны цилиндрической геометрии, описывающая возбуждение аксиально-симметричных мод ТМ поляризации. Проведено сопоставление результатов моделирования с известными экспериментальными данными и продемонстрировано их хорошее соответствие. Обоснована возможность эффективной работы генераторов поверхностной волны в коротковолновых диапазонах вплоть до субмиллиметрового.

4. На основе проведенного теоретического анализа выполнены эксперименты по генерации субнаносекундных импульсов СИ в режиме возбуждения поверхностных волн, в которых получен рекордный для коротковолновой части миллиметрового диапазона уровень пиковой мощности до 70 МВт.

Практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость работы обусловлена ее направленностью на развитие теоретических методов описания усиления и генерации мощного коротковолнового электромагнитного излучения при прямолинейном движении релятивистских электронных потоков и сгустков в различных электродинамических системах. Источники электромагнитного излучения большой мощности в широком диапазоне длин волн (от сантиметрового до

субмиллиметрового) обладают значительным потенциалом с точки зрения их практического использования в короткоимпульсной радиолокации, системах электронного противодействия, нетепловом воздействии электромагнитных импульсов на различные среды, фотохимии, медицине и т.д. [29, 30].

Апробация работы

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1а-18а] и обсуждались на международных конференциях «IRMM THz (Майнц, Германия, 2013; Гонконг, Китай, 2015), «Мощное микроволновое излучение и терагерцовые волны: источники и приложения» (Н. Новгород, 2017), и всероссийских научных конференциях «Проблемы СВЧ электроники» (Москва, 2013), «IX всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн» (Н. Новгород, 2013), «X всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн» (Н. Новгород, 2016), а также на внутренних семинарах ИПФ РАН. Результаты докладывались на конкурсе молодых ученых ИПФ РАН 2013 года.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 18 работ, из которых 13 статей опубликовано в реферируемых журналах списка ВАК и 5 тезисов докладов.

Личный вклад автора в проведенные исследования

Все приведенные в диссертации и вошедшие в работы [1а-18а] результаты получены либо лично соискателем, либо при его непосредственном участии. Аналитические исследования, численное моделирование в рамках усредненных квазиоптических моделей, оценка и оптимизация параметров, а также физическая интерпретация результатов проведены автором самостоятельно при консультативной поддержке научного руководителя Н.С. Гинзбурга и соавторов совместных работ. Численное моделирование в рамках усредненных квазиоптических моделей осуществлено соискателем при использовании программных кодов А.С. Сергеева. Экспериментальные работы по генерации импульсов СИ были выполнены в ИЭФ УрО РАН, автору принадлежит участие в разработке экспериментального макета и интерпретации экспериментальных данных.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и списка трудов автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 159 страниц, включая 54 рисунка. Список литературы содержит 110 наименований, список трудов по теме диссертации состоит из 13 статей в реферируемых журналах из списка ВАК и 5 тезисов докладов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Первая глава посвящена анализу усилителей черенковского типа, основанных на индуцированном излучении прямолинейных релятивистских электронных пучков (РЭП), движущихся вблизи границы раздела сред, на которой возможно формирование поверхностных волн. К числу таких систем относятся периодически гофрированные структуры, поверхности металлов с конечной проводимостью (усилители, основанные на эффекте резистивной неустойчивости [25]) а также полугораниченной плазмы (плазменные усилители [26]).

Показано, что во всех перечисленных системах анализ процесса усиления может быть проведен в рамках универсальной квазиоптической модели, в которой распространение поверхностных волн описывается параболическим уравнением для амплитуды волнового пучка, дополненным импедансными граничными условиями для поля на формирующей поверхностную волну границе [5a]. Самосогласованная система уравнений включает также нелинейные уравнения движения электронов. Развитая модель позволяет последовательно учесть поля высокочастотного пространственного заряда.

В **Разделе 1.1** проведен анализ черенковского усилителя, в котором прямолинейный ленточный РЭП синхронно взаимодействует с медленной поверхностной волной, распространяющейся над синусоидально гофрированной поверхностью $l(z) = l_0 \cos(hz)$, $l_0 \ll d, \lambda$ идеального проводника (рис. 1).

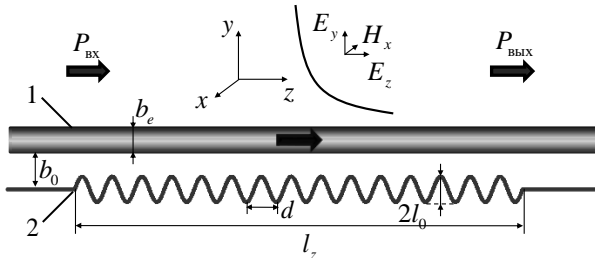


Рис. 1. Схема усилителя поверхностной волны: 1 – релятивистский электронный пучок, 2 – гофрированная металлическая поверхность.

В такой системе при частотах, далеких от брэгговского резонанса, справедливо импедансное приближение, в котором поле излучения представляется в виде ТМ-поляризованного волнового пучка, распространяющегося вдоль плоской импедансной поверхности. При этом процесс усиления поверхностных волн описывается параболическим уравнением для амплитуды волнового пучка, дополненным уравнениями движения электронов и граничными условиями на катодном конце пространства взаимодействия

$$\frac{\partial C}{\partial Z} + i \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} + i \chi \delta(Y) C = i \frac{1}{B_e} \frac{\partial}{\partial Y} (F(Y) J), \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = \text{Re} \left(i \frac{\partial C}{\partial Y} e^{i\theta} - i \frac{1}{B_e} (F(Y) J) e^{i\theta} \right), \quad (2)$$

$$\theta|_{Z=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi), \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right|_{Z=0} = \Delta, \quad C|_{Z=0} = C_0(Y), \quad (3)$$

Здесь $\delta(Y)$ – дельта-функция, θ – фаза электрона в поле синхронной волны, $\Delta = G^{-1}(\beta_0^{-1} - 1)$ – расстройка синхронизма, $J = \pi^{-1} \int_0^{2\pi} \exp(-i\theta) d\theta_0$ – амплитуда высокочастотного электронного тока. В уравнениях (1)-(3) использованы нормировки $Z = Gkz$, $Y = \sqrt{2G}ky$, $C = \sqrt{2e\tilde{\mu}}H_0 / mc^2\gamma_0 kG^{3/2}$ – нормированная амплитуда основной пространственной гармоники, $G = 2(\lambda\tilde{\mu}eI_0 / mc^3\gamma_0)^{2/3}$ – аналог параметра Пирса, $\tilde{\mu} = \gamma_0^{-2}\beta_0^{-3}$ – параметр инерционной группировки. Функция $F(Y)$ определяет поперечное распределение плотности тока пучка с эффективной толщиной $B_e = \int_0^\infty F(Y) dY$. Импеданс является действительной функцией частоты

$$\chi(k) = \frac{l_0^2 \bar{h}^2}{4\sqrt{2G}} \left(\frac{k}{\sqrt{(k+\bar{h})^2 - k^2}} + \frac{k}{\sqrt{(k-\bar{h})^2 - k^2}} \right). \quad (4)$$

Последний член в правой части уравнения (2) возникает при учете продольной компоненты электрического тока в выражении для синхронного поля E_z и описывает влияние высокочастотного пространственного заряда модулированного пучка.

Линейная теория. В приближении малого сигнала для случая предельно тонкого ленточного РЭП и бесконечной по продольной координате системы уравнений (1)-(2) следует дисперсионное соотношение

$$(\Delta - \Gamma)^2 (g - \chi) = -\frac{g}{2} e^{-gB_0} \left((g + \chi) e^{-gB_0} - (g - \chi) e^{gB_0} \right). \quad (5)$$

При этом поле представляется в виде $C \sim \exp(-i\Gamma Z - gY)$, g – поперечный декремент, Γ – малая поправка к продольному волновому числу h .

Уравнение (5) имеет счетное множество комплексных решений, из которых наименьшие по абсолютному значению представлены на рис. 2. Только одно из этих решений, обозначенное индексом «1» на врезках с увеличенным масштабом, представляет собой поверхностную волну, усиливающуюся в продольном направлении $\text{Im } \Gamma > 0$, амплитуда которой спадает по y при удалении от пучка и гофрированной поверхности $\text{Re } g > 0$, и которая имеет поток энергии, направленный от пучка к периферии $\text{Im } g > 0$.

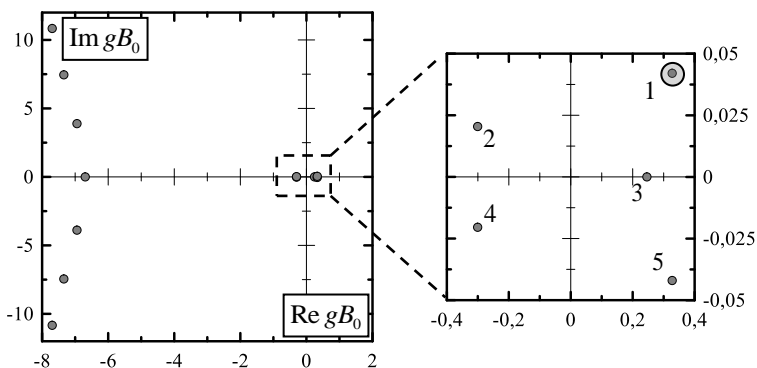


Рис. 2. (а) Наименьшие по абсолютному значению корни уравнения (5); $\chi = 3$, $\Delta = 9$, $B_0 = 0.1$.

На рис. 3 показана зависимость продольного инкремента $\text{Im } \Gamma$ от величины расстройки Δ . Максимум инкремента достигается в условиях, близких к точному синхронизму $\Delta = \chi^2$ (рис. 3а); по мере удаления электронного потока от импедансной поверхности продольный инкремент падает, а область положительных инкрементов сужается, стремясь к окрестности точки $\Delta = \chi^2$ (рис. 3б). Имеется срыв режима усиления в области малых значений Δ , когда электроны сильно обгоняют волну. Кроме того, срыв возникает в области больших Δ , когда скорость электронов становится значительно меньше фазовой скорости замедленной волны.

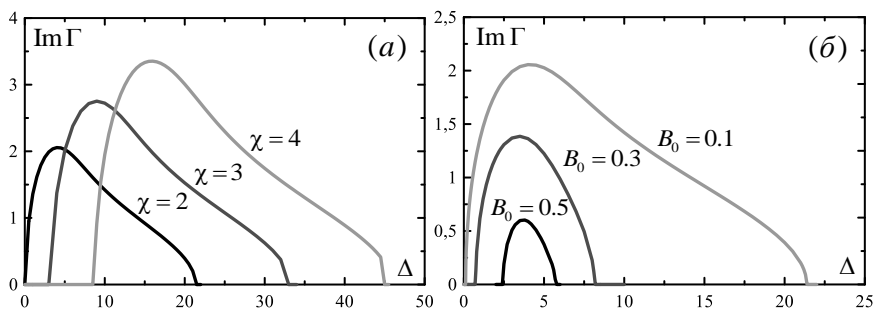


Рис. 3. (а) Зависимости продольного инкремента $\text{Im } \Gamma$ от Δ для различных χ при $B_0 = 0.1$. (б) То же, но при $\chi = 2$ и различных значениях B_0 .

Заметим, что для традиционных моделей черенковских ЛБВ с фиксированной структурой поля подобный порог возникает при учете влияния полей пространственного заряда электронного пучка. В случае предельно малого зазора $B_0 \rightarrow 0$ пороговое значение Δ стремится к бесконечности, что может быть проинтерпретировано как следствие взаимной компенсации полей пространственного заряда пучка и его отражения в металлической поверхности идеального проводника.

На основе системы уравнений (1)-(3) проведено моделирование нелинейного режима усиления, что позволило определить выходную мощность и электронный КПД в субмиллиметровом диапазоне. На рис. 4 представлены результаты оптимизации выходных характеристик усилителя поверхностной волны по расстройке. Черной линии соответствует режим с максимальным инкрементом ($\Delta = 12.25$, $\chi = 3.5$), серой – с максимальным КПД ($\Delta = 7$).

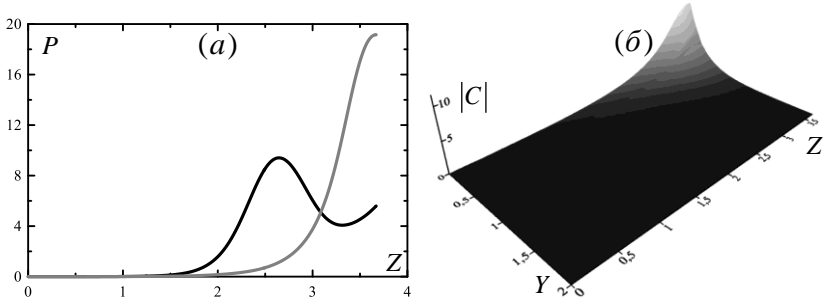


Рис. 4. (а) Зависимость нормированной мощности усиливаемой волны от продольной координаты в режимах, соответствующих максимуму инкремента $\Delta = 12.25$ (черная линия) и максимуму КПД $\Delta = 7$ (серая линия), (б) Пространственное распределение амплитуды усиливаемой волны при $\Delta = 7$, $\chi = 3.5$, $B_0 = 0.1$.

На основании результатов моделирования проведена оценка параметров черенковского усилителя субмиллиметрового диапазона ($\lambda = 0.9$ мм). В режиме с максимальной мощностью необходимая для достижения требуемой расстройки ($\Delta = 7$) энергия электронов при периоде гофрировки 0.25 мм и ее амплитуде 0.068 мм равна 1 МэВ. При погонной плотности тока 1.2 кА/см, расстоянии от гофрировки до пучка 0.1 мм, толщине пучка 0.2 мм и погонной мощности падающего излучения 50 кВт/см на длине пространства взаимодействия 5.9 см достигается коэффициент усиления $K \approx 40$ Дб. Соответственно, мощность усиленного сигнала в этом режиме составляет 550 МВт/см при КПД 45%. В процессе усиления волна остается прижатой к поверхности замедляющей системы (рис. 4б).

В Разделе 1.2 проанализирована возможность усиления излучения на основе эффекта резистивной неустойчивости электронного пучка при его движении над регулярной поверхностью металла с конечной проводимостью. В этом случае используется импедансное граничное условие Леонтовича [18]. Резистивный усилитель может быть также описан системой уравнений (1)-(3) с сохранением всех нормировок. Импеданс в приближении сильного скин-эффекта (металлы с большой проводимостью σ) представляется в виде $\chi = (1 - i)w$, где $w = kd_{ck} / 2\sqrt{2G}$ – нормированное волновое сопротивление среды, $d_{ck} = \sqrt{c\lambda / 4\pi^2\mu\sigma}$ – глубина скин-слоя [18].

Развитие неустойчивости в такой системе обусловлено существованием в электронном потоке волн пространственного заряда, имеющих отрицательную энергию. Дисперсионное уравнение для резистивного усилителя в приближении малого сигнала с точностью до определения импеданса совпадает с дисперсионным уравнением (5) с сохранением условий выбора решения, соответствующего усиливаемой волне. Наименьшие по абсолютному значению корни уравнения (5) приведены на рис. 5а. Распределения модулей амплитуд поперечной компоненты магнитного поля и действующей на электроны продольной компоненты электрического поля для нарастающего решения «1» показаны на рис. 5б-г. По мере уменьшения абсолютного значения поверхностного импеданса и увеличения расстояния от поверхности распределение полей приближается к собственному полю пучка, локализованному вблизи электронного потока.

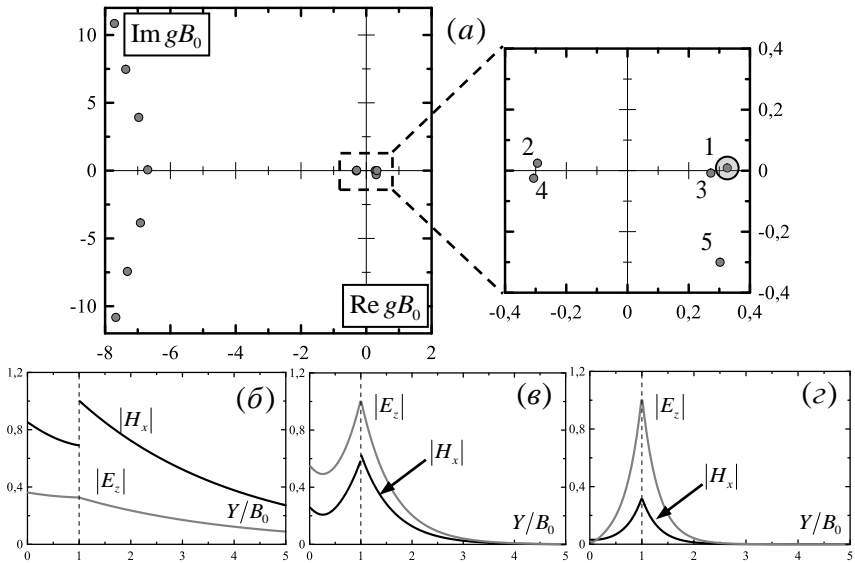


Рис. 5. (а) Наименьшие по абсолютному значению корни уравнения (5); $w = 3$, $\Delta = 9$, $B_0 = 0.1$. (б)-(г) Нормированные поперечные структуры модулей амплитуд магнитного поля H_x (черная линия) и продольной компоненты электрического поля E_z (серая линия) для случая бесконечно тонкого ленточного электронного пучка: $\Delta = 9$, (б) $w = 3$, $B_0 = 0.1$; (в) $w = 3$, $B_0 = 0.5$; (г) $w = 3$, $B_0 = 1$.

На основании развитой теории проведено моделирование усилителя на основе резистивной неустойчивости в субмиллиметровом диапазоне (0.3 мм). В качестве резистивного материала выбран феррит. Поскольку в субмиллиметровом диапазоне для феррита приближение сильного скин-эффекта не действует, при записи волнового сопротивления использовалось волновое сопротивление общего вида $w = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ с диэлектрической прони-

цаемостью $\varepsilon = \varepsilon' + 4\pi\sigma i/\omega$. Для РЭП с параметрами 1 МэВ, 1.3 кА/см, $b_e = 0.1$ мм, $b_0 = 0.1$ мм, выходная плотность мощности излучения в режиме насыщения равна 10.6 МВт/см при коэффициенте усиления около 40 дБ (плотность мощности затравочного сигнала 1 кВт/см). Насыщение усиления достигается на длине 8.8 см. Волновой и электронный КПД равны 0.8% и 3.8%. Таким образом, имеют место значительные омические потери. Тем не менее, поскольку в коротковолновых диапазонах большие омические потери практически неизбежны при любом механизме взаимодействия, очевидным достоинством использования резистивного механизма является относительная простота системы в совокупности с ее компактностью.

В Разделе 1.3 развивается теория плазменных усилителей поверхностных волн, в которых электронный поток движется прямолинейно над границей изотропной плазмы. В такой системе импедансное приближение применимо для описания возбуждения волн с частотами много меньше плазменной частоты ω_p . На поверхности полуограниченной изотропной холодной бесстолкновительной плазмы в диапазоне частот $\omega < \omega_p / \sqrt{2}$ возможно распространение незатухающих ТМ-поляризованных поверхностных волн, дисперсия которых описывается формулой $h = k\sqrt{\varepsilon/(1+\varepsilon)}$ [23], где диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$ является отрицательной величиной. Такие волны в современной литературе называются поверхностными плазмон-поляритонами, их дисперсионная характеристика изображена на рис. 6.

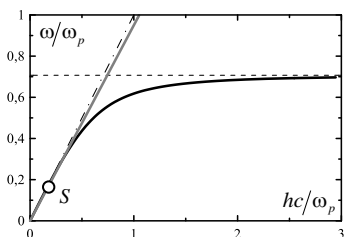


Рис. 6. Дисперсионная характеристика плазмон-поляритона над поверхностью изотропной плазмы (чёрная сплошная линия); серая сплошная – характеристика электронного пучка; штрих-пунктир – световой конус; штриховая линия – предельная частота плазмона $\omega_p / \sqrt{2}$. Точка *S* соответствует условию черенковского синхронизма электронного пучка с плазменной волной.

В рассматриваемой системе импедансное приближение применимо для описания возбуждения волн с частотами много меньше плазменной частоты ω_p . При больших отрицательных значениях ε поверхностный импеданс можно представить в виде $\chi = (2G|\varepsilon|)^{-1/2}$. Он является чисто действительной величиной, и соответственно, для описания черенковского плазменного усилителя поверхностных волн может быть использован теоретический анализ, проведенный в Разделе 1.1. На этом основании показана возможность реализации плазменного усилителя поверхностных волн с длиной волны 1.5 мм. При плотности плазмы $n_e = 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³ для РЭП с параметрами 1 кА/см, $b_e = 0.5$ мм, $b_0 = 0.5$ мм, максимальная выходная плотность мощности излучения в режиме насыщения равна 600 МВт/см (электронный

КПД $\sim 40\%$). При затравочном сигнале ~ 40 кВт/см и длине области взаимодействия $l_z = 30$ см коэффициент усиления по мощности ~ 42 дБ.

В качестве перспективного приложения развиваемой модели в работе исследована возможность возбуждения плазмон-поляритонов над поверхностями металлов в **инфракрасном диапазоне**. При этом для описания дисперсии волн в металлах использована модель свободных электронов (Друде-Лоренца) [23]. Если в качестве материала поверхности выбрано серебро ($\omega_p = 1.4 \cdot 10^4$ ТГц), которое является одним из наиболее широко используемых в плазмонике металлов [31], то при частоте усиливаемого сигнала 120 ТГц для выполнения условий черенковского синхронизма энергия электронов должна достигать 9.2 МВ. При плотности тока 30 кА/см, толщине пучка $2b_e = 0.1$ мм и при скользящем падении $b_0 = 0$. () коэффициент усиления по мощности может быть оценен на уровне 30 дБ. Электронные пучки с описанными выше параметрами могут быть получены на основе фотоинжекторов. При этом, с учетом импульсного характера таких пучков, представляется перспективным использование режима сверхизлучения.

В **Приложении** продемонстрирована совместимость граничных условий Леонтовича [18] с условиями применимости квазиоптического приближения, в рамках которого электромагнитное поле представляется в виде ТМ-поляризованного волнового пучка, соответствующего суперпозиции распространяющихся под малыми углами к импедансной поверхности волн (скользящее падение). С этой целью использован общий вид граничных условий для электромагнитного поля на границе раздела «вакуум-среда» в случае падения плоской волны под произвольным углом, сформулированный в работе В.А. Фока [32].

Во **второй главе** квазиоптический подход [5а] использован для описания электронно-волнового взаимодействия в релятивистских СВЧ генераторах черенковского типа со сверхразмерными электродинамическими системами цилиндрической геометрии, которые в литературе называются также многоволновыми черенковскими генераторами [5] или генераторами поверхностных волн.

Основное внимание в данной главе уделяется развитию нестационарной квазиоптической модели, в предположении нефиксированности продольной и поперечной структуры полей. Показано, что в определенной области параметров результаты квазиоптической модели хорошо согласуются с известными экспериментальными исследованиями генераторов указанного типа [33]. В то же время, по сравнению с предшествующим анализом в рамках планарной модели [19], цилиндрическая модель дает более точное описание дисперсии аксиально-симметричных волн в условиях умеренной сверхразмерности и позволяет провести более детальный расчет параметров генераторов. Кроме того, цилиндрическая модель допускает предельный переход к известной теории одномодовых релятивистских черенковских генераторов с фиксированной поперечной структурой поля [10-17].

В рамках развиваемой модели выделены различные режимы работы черенковских генераторов со сверхразмерными электродинамическими системами, включая режим возбуждения колебаний π -вида (МВЧГ) и режим возбуждения поверхностной волны типа ЛОВ. Показано, что возбуждение поверхностных волн может быть использовано для генерации миллиметрового и субмиллиметрового излучения мультимегаваттного уровня мощности.

В **Разделе 2.1** получена самосогласованная система уравнений, описывающая возбуждение высокочастотных полей прямолинейными релятивистскими электронными потоками в сверхразмерных слабогофрированных цилиндрических волноводах. Показано, что самосогласованная система уравнений значительно упрощается в предположении возбуждения электронными потоками аксиально-симметричных ТМ мод. Такое упрощение, как следует из сопоставления с результатами PIC моделирования и результатами проведенных ранее экспериментальных исследований [7], допустимо при умеренных сверхразмерностях электродинамических систем ($r_0 / \lambda < 2$, где r_0 – средний радиус волновода).

В **Разделе 2.2** в рамках квазиоптического приближения исследовано распространение симметричных волн ТМ-поляризации в сверхразмерных слабогофрированных волноводах цилиндрической геометрии. В условиях малой синусоидальной гофрировки с амплитудой r_1 , ограничиваясь учетом первых трех пространственных гармоник, получено дисперсионное уравнение для нормальных волн

$$g_0 J_0(g_0 r_0) = \frac{r_1^2}{4} J_1(g_0 r_0) \left(\frac{(\kappa_{0n}^2 - \bar{h} h_0)^2 J_1(g_1 r_0)}{g_1 J_0(g_1 r_0)} + \frac{(\kappa_{0n}^2 + \bar{h} h_0)^2 J_1(g_{-1} r_0)}{g_{-1} J_0(g_{-1} r_0)} \right), \quad (6)$$

где $\kappa_{0n} = v_{0n} / r_0$ – n -й корень нулевого Бесселя $J_0(v_{0n}) = 0$, n – радиальный номер моды, g_i – поперечные волновые числа пространственных гармоник.

На рис. 7 показано хорошее соответствие дисперсионных характеристик, следующих из уравнения (6), с результатами численного моделирования на основе FIT кода CST Studio Suite при малых глубинах гофра (до $\lambda / 10$, см. рис. 7). Выделены две области параметров, в которых дисперсионное соотношение (6) допускает существенные упрощения. В первой, при выполнении условий брэгговского резонанса ($k, h \approx \bar{h} / 2$), поле излучения представляется в виде двух встречных квазиоптических волновых пучков. Во втором случае, при удалении частоты излучения от брэгговского резонанса, справедливо импедансное приближение, в котором поле излучения представляется в виде одного волнового пучка и его пространственных гармоник. Если указанный пучок распространяется попутно электронному пучку, то реализуется рассмотренный в **Главе 1** режим ЛБВ. В противном случае, когда групповая скорость волнового пучка направлена навстречу поступательному движению электронов, реализуется режим ЛОВ.

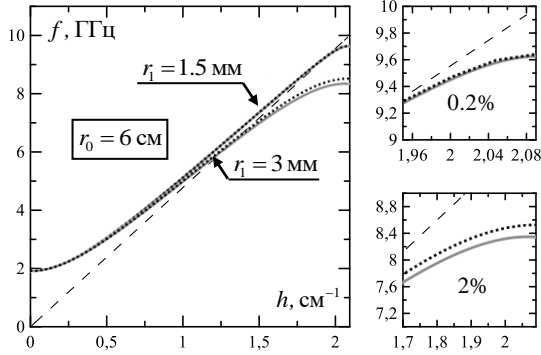


Рис. 7. Серые линии – дисперсионные характеристики моды TM_{01} , черные пунктирные линии – те же характеристики, полученные на основе кода CST Studio Suite. $r_0 = 6$ см, $d = 1.5$ см, $r_1 = 1.5$ мм и 3 мм.

Важно отметить, что только дисперсионная характеристика основной нижней моды TM_{01} при условии $r_1 > 2\pi^2 d^2 / r_0$ пересекает световой конус ($k = h$) в границах первой зоны Бриллюэна и формирует поверхностную волну. В то же время дисперсионные характеристики всех прочих нормальных TM_{0n} мод с радиальными индексами $n > 1$ ни при каких значениях глубины гофра не пересекают светового конуса.

Кроме того, в данном разделе для гофрированной области конечной длины l_z проведен анализ краевой задачи о собственных поверхностных модах. На основе пространственно-временного подхода найдена собственная частота фундаментальной моды, которая лежит вблизи вершины дисперсионной кривой. Пространственная структура указанной моды изображена на рис. 8, где приведены распределения амплитуд составляющих ее встречных парциальных волновых пучков, имеющих колоколообразное распределение по продольной координате и квазиэкспоненциально спадающих по поперечной (радиальной) координате при удалении от гофрированной поверхности.

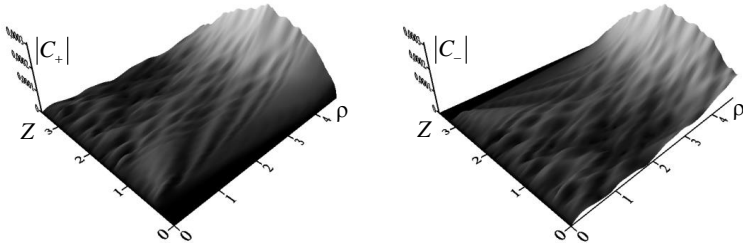


Рис. 8. Пространственные структуры парциальных волн, составляющих фундаментальную поверхностную моду. $l_z = 10d$, $d = 1.4$ см, $r_0 = 4.5$ см, $r_1 = 0.3$ см.

В Разделе 2.3, в предположении возбуждения аксиально-симметричных волн, проведен анализ генераторов поверхностной волны. Для описания генераторов колебаний π -вида (МВЧГ) может быть использовано представление поля в виде двух встречных волновых пучков

$$H_x = \text{Re}\left(H_0(z, t, r)e^{i\omega t - i\hbar z} + H_{-1}(z, t, r)e^{i\omega t - i(h - \bar{h})z}\right), \quad (7)$$

связь которых на гофрированной поверхности и взаимодействие с РЭП может быть описано системой уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_+}{\partial \tau} + \frac{\partial C_+}{\partial Z} + i \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho C_+)}{\partial \rho} \right) + \hat{\sigma} \delta(\rho - \rho_0) C_+ + i \Omega_0 C_+ = \\ = i \alpha \delta(\rho - \rho_0) C_- - G \frac{\partial}{\partial \rho} (f(\rho) J), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_-}{\partial \tau} - \frac{\partial C_-}{\partial Z} + i \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho C_-)}{\partial \rho} \right) + \hat{\sigma} \delta(\rho - \rho_0) C_- + i \Omega_0 C_- = i \alpha \delta(\rho - \rho_0) C_+, \quad (9)$$

$$\frac{d\mathcal{E}}{dZ} = \text{Re} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho C_+)}{\partial \rho} e^{i\theta} - i G J e^{i\theta} \right), \quad \frac{d\theta}{dZ} = \mathcal{E}^{-2} + \Delta, \quad (10)$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = \frac{\gamma}{\gamma_0}, \quad Z = \frac{k}{2\gamma_0^2} z, \quad \tau = \frac{\hbar c}{4\gamma_0^2} t, \quad \rho = \sqrt{\frac{k\hbar}{2\gamma_0^2}} r, \quad \alpha = \frac{r_1 \gamma_0}{\sqrt{2\hbar k}} \left(\kappa_{01}^2 + \frac{\hbar^2}{2} \right), \\ \Omega_0 = \frac{2\gamma_0^2}{k\hbar} \kappa_0^2, \quad C_{0,-1} = i \frac{e\sqrt{2k\hbar}}{m\omega^2} H_{0,-1}, \quad \Delta = \frac{2\gamma_0^2}{k} \left(k - \frac{\hbar}{2} \right), \quad G = 8\pi\gamma_0 \frac{eI_0}{mc^3} \frac{1}{k^2 N_e}, \end{aligned}$$

$\hat{\sigma}$ – параметр омических потерь, $N_e = 2\pi \int_0^{r_0} f(r) r dr$, $f(r)$ – функция распределения электронной плотности.

На основе уравнений (8)-(10) проведено моделирование экспериментально реализованных черенковских генераторов в диапазонах 10 ГГц и 30 ГГц [7,33]. Показано, что квазиоптическая модель достаточно точно описывает процессы электронно-волнового взаимодействия как в системах большой сверхразмерности ($r_0 / \lambda \sim 1.5$), так и в случае ЛОВ с одномодовыми гофрированными волноводами ($r_0 / \lambda \sim 0.5$).

Демонстрация адекватности квазиоптической модели позволила провести моделирование генераторов поверхностной волны в коротковолновых диапазонах. На рис. 9 показаны результаты оптимизации характеристик генераторов поверхностной волны в диапазоне 300 ГГц. Определены области параметров, в которых достигаются минимальные стартовые токи и максимальные КПД. При токе пучка 380 А, энергии частиц 1.2 МэВ, радиусе волновода 1.5 мм, среднем радиусе пучка 1.2 мм, периоде и глубине гофра 0.5 мм и 0.15 мм выходная мощность генератора может достигать

~140 МВт. Таким образом, обоснована возможность создания генераторов с выходной мощностью в сотни мегаватт в коротковолновой части миллиметрового диапазона.

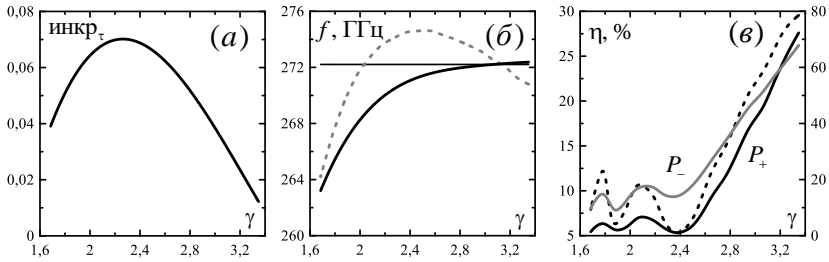


Рис. 9. Зависимость характеристик генератора поверхностной волны диапазона 300 ГГц от энергии электронов: (а) нормированный временной инкремент; (б) частота генерации (сплошная черная линия), штриховая линия – частота синхронизма, рассчитываемая по точке пересечения характеристик электронного пучка с дисперсионной кривой волны, черная прямая соответствует частоте холодной моды; (в) КПД (штриховая линия) и мощности (в МВт) на коллекторном (черная линия) и катодном (серая линия) концах системы.

Структура полей в стационарном режиме генерации при работе в окрестности π -вида близка к холодной моде резонатора (рис. 8). При уменьшении энергии электронов точка пересечения дисперсионных кривых волны и пучка сдвигается в область ЛОВ. При этом мощность излучения в основном связана с возбуждением встречной волны. Поток, связанный с попутной волной, становится пренебрежимо мал. Фактически эта волна трансформируется в синхронную пространственную гармонику. Такой режим, который следует назвать ЛОВ на поверхностной волне, может быть описан в рамках импедансного приближения.

Третья глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процессов генерации импульсов черенковского сверхизлучения (СИ), реализующемуся при движении протяженных электронных пучков в сверхразмерных гофрированных цилиндрических волноводах. Показано, что использование режимов возбуждения поверхностных волн позволяет существенно поднять пиковую мощность импульсов СИ в коротковолновых диапазонах.

В **Разделе 3.1** самосогласованная система уравнений (8)-(10) модифицирована с учетом конечности длины электронного пучка. На ее основе проведен анализ различных режимов генерации, который включает в качестве предельного случая переход к описанию формирования импульсов СИ в волноводах малой сверхразмерности при возбуждении объемных волн.

Для волноводов большой сверхразмерности исследованы режимы возбуждения попутной и встречной поверхностных волн, а также режимы, близкие к возбуждению колебаний π -вида. В частности, проведена оптимизация параметров генераторов импульсов СИ в диапазоне 140 ГГц. Расчеты

проводились для коротких электронных сгустков с типичными для ускорителя «РАДАН 303» параметрами: ток 2 кА, энергия частиц до 400 кэВ, длительность электронного импульса до 500 пс. Электродинамическая система представляла собой сверхразмерный гофрированный волновод с диаметром 7.5 мм, глубиной гофрировки 0.36 мм, периодом гофра 0.825 мм и длиной гофрированной области 25 мм.

Результаты моделирования приведены на рис.10. Режимы возбуждения встречной поверхностной волны, соответствующие сравнительно малым значениям ускоряющего напряжения (< 200 кВ), обладают относительно небольшой выходной мощностью, в то время, как в режимах возбуждения колебаний π -вида (> 350 кВ) импульсы сильно расплываются. Таким образом, проведенный анализ показал, что наиболее привлекателен режим возбуждения поверхностных волн при относительно небольшом (в масштабе зоны Бриллюэна) смещении точки электронно-волнового синхронизма от точного брэгговского резонанса в область возбуждения встречной поверхностной волны, соответствующей энергии электронов 300 кВ.

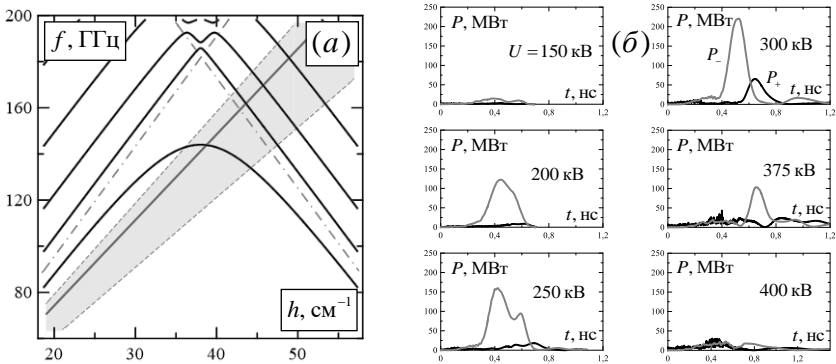


Рис. 10. (а) Черные линии – дисперсионные характеристики нормальных волн гофрированного волновода ($r_0 / \lambda \approx 1.75$), серая сплошная линия соответствует режиму с оптимальным ускоряющим напряжением (300 кВ), область, в которой происходит смещение электронных характеристик при изменении энергии электронов, заштрихована (б) Эволюция формы импульсов СИ в режиме возбуждения поверхностных волн при изменении энергии электронов. Черные линии – мощность излучения на коллекторном конце системы P_+ , серые линии – мощность на катодном конце P_- .

В Разделе 3.2 приведено сопоставление результатов теоретического исследования генерации импульсов СИ в коротковолновой части миллиметрового диапазона в рамках усредненной квазиоптической модели с результатами моделирования на основе PIC кода CST Studio Suite. Показано хорошее соответствие полученных результатов.

Проведенный теоретический анализ лег в основу экспериментов, реализованных в ИЭФ УрО РАН (Екатеринбург) на базе ускорителя «РА-

ДАН 303», в которых наблюдалась генерация субнаносекундных импульсов черенковского сверхизлучения в режиме возбуждения поверхностных волн. В результате экспериментальных исследований были получены импульсы СИ с центральной частотой 140 ГГц, длительностью 150 пс и экстремально большими для заданного диапазона пиковыми мощностями 50-70 МВт (см. рис 11). Характеристики наблюдаемых импульсов СИ находились в хорошем соответствии с результатами теоретического анализа, что открывает возможности дальнейшего повышения частоты импульсов СИ при поддержании пиковой мощности на мультимегаваттном уровне.

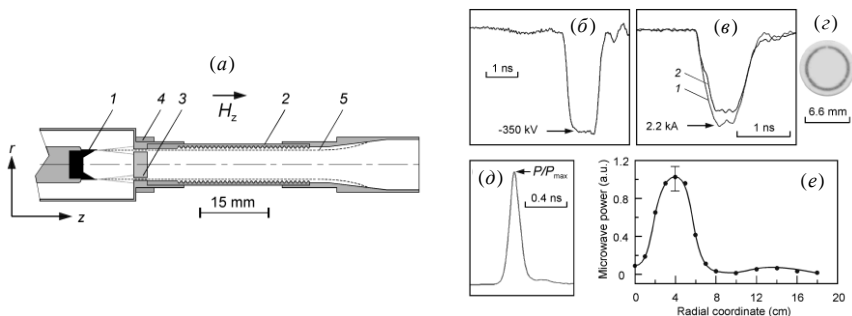


Рис. 11. (а) Схема генератора импульсов СИ с центральной частотой 140 ГГц: 1 – графитовый катод; 2 – замедляющая электродинамическая структура; 3 – рефлектор; 4 – медное кольцо; 5 – траектории электронов. Результаты экспериментов: (б) форма импульса ускоряющего напряжения; (в) ток пучка до (кривая 1) и после коллимации (кривая 2); (г) поперечный профиль пучка на входе в пространство взаимодействия; (д) детектируемый импульс СИ; (е) диаграмма направленности излучения на расстоянии 0.9 м от выходного отверстия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В приближении малого сигнала с учетом высокочастотных полей пространственного заряда получен общий вид дисперсионного уравнения, которое позволяет определить инкременты конвективной неустойчивости, развивающейся при прямолинейном движении релятивистских электронных потоков над импедансными поверхностями. Указанные поверхности могут иметь различную физическую природу и, при выполнении определенных условий, включают плоские и гофрированные металлические поверхности с конечной проводимостью, а также границу раздела плазма-вакуум.

2. В рамках квазиоптической теории с использованием импедансного граничного условия на слабогофрированной металлической поверхности построена нелинейная теория релятивистских черенковских усилителей поверхностной волны планарной геометрии. Продемонстрирован предель-

ный переход к известному приближению фиксированной поперечной структуры поля. Для исследуемого класса усилителей проведен анализ коэффициентов усиления и электронного КПД в различных частотных диапазонах от сантиметрового до субмиллиметрового.

3. На основе квазиоптической теории с использованием граничного условия Леонтовича проведен теоретический анализ линейной и нелинейной стадий резистивной неустойчивости, возникающей при движении электронных пучков вблизи металлических поверхностей с конечной проводимостью. Продемонстрирована перспективность использования указанного эффекта для реализации усилителей в коротковолновых диапазонах, проведены оценки коэффициентов усиления и электронного КПД.

4. В предположении возбуждения аксиально-симметричных мод построена квазиоптическая модель генераторов поверхностных волн цилиндрической геометрии на основе сверхразмерных волноводов с малой глубиной гофрировки, запитываемых трубчатыми релятивистскими электронными пучками. Проведено сопоставление теоретических результатов с известными экспериментальными данными по реализации генераторов указанного типа в сантиметровом диапазоне длин волн и показано хорошее соответствие, как по стартовым условиям, так и по электронному КПД. На основе численного моделирования продемонстрирована перспективность реализации генераторов указанного типа в коротковолновой части миллиметрового диапазона.

5. Развита теория черенковского сверхизлучения протяженных электронных сгустков в сверхразмерных гофрированных цилиндрических волноводах. Проведенный теоретический анализ лег в основу эксперимента по генерации коротких импульсов в режиме возбуждения поверхностных волн с использованием субнаносекундного ускорителя «РАДАН-303». Параметры экспериментально наблюдаемых субнаносекундных импульсов черенковского СИ с центральной частотой 140 ГГц, находились в хорошем соответствии с результатами теоретического анализа и имели рекордную для коротковолновой части миллиметрового диапазона пиковую мощность 50-70 МВт.

Список цитированной литературы

1. Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д., Сморгонский А.В., Цопп Л.Э. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения потоком релятивистских электронов. // Письма в ЖЭТФ, 1973, т.18, вып.4, с.232-235.
2. Carmel Y., Ivers J., Kribel R.E., Nation J. Intense coherent Cerenkov radiation due to the interaction of a relativistic electron beam with a slow-wave structure // Phys. Rev. Lett., 1974, V.33, №21, p.1278-1282.
3. Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Ковалев Н.Ф., Месяц Г.А., Корovin С.Д., Ростов В.В., Сморгонский А.В. Высокоэффективный релятивистский карсиноотрон // Письма в ЖТФ, 1980, т.6, вып.7, с.443-447.
4. Bratman V.L., Denisov G.G., Korovin S.D., Ofitserov M.M., Polevin S.D., Rostov V.V. Millimeter-wave HF relativistic electron oscillators // IEEE Trans. on Plasma Science, 1987, V. PS-15, №1, p.2-15.
5. Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы // Новосибирск: Наука. Сиб. Отд., 1991, 296с.
6. Gunin A.V., Klimov A.I., Korovin S.D., Kurkan I.K., Pegel I.V., Polevin S.D., Roitman A.M., Rostov V.V., Stepchenko A.S., Totmeninov E.M. Relativistic X-band BWO with 3-GW output power // IEEE Trans. on Plasma Science, 1998, V.26, №3, p.326-331.
7. Vlasov A.N., Shkvarunets A.G., Rodgers J.C., Carmel Y., Antonsen T.M., Abuelfadl T.M., Lingze D., Cherepenin V.A., Nusinovich G.S., Botton M., Granatstein V.L. Overmoded GW-class surface-wave microwave oscillator // IEEE Trans. on Plasma Science, 2000, V.28, №3, p.550-560.
8. Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Fuchs M.I., Kolganov N.G., Kovalev N.F., Petelin M.I., Savelyev A.V., Schamiloglu E., Soluyanov E.I., Yastrebov V.V. An X-band gigawatt amplifier // IEEE Trans. on Plasma Science, 2002, V.30, №3, p.1041-1052.
9. Ростов В.В., Тотьменинов Е.М., Яландин М.И. Мощные релятивистские СВЧ-генераторы на основе лампы обратной волны с модулирующим резонансным рефлектором // ЖТФ, 2008, т.78, вып.11, с.85-92.
10. Релятивистская высокочастотная электроника, вып.1-6, под ред. А.В. Гапонова-Грехова, Горький: ИПФ АН СССР / Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1979-1992.
11. Ковалев Н.Ф., Орлова И.М., Петелин М.И. Трансформация волн в многомодовом волноводе с гофрированными стенками // Изв. Вузов. Радиопизика, 1968, т.11, вып.5, с.783-786.
12. Шевчик В.Н., Трубецков Д.И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ // М.: Сов. Радио, 1970, 580с.
13. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике // М.: Сов. Радио, 1973, 400с.

14. Булгакова Л.В., Трубецков Д.И., Фишер В.Л., Шевчик В.Н. Лекции по электронике СВЧ приборов типа О // Саратов: Изд-во Сар. ун-та, 1974, 221с.
15. Ковалев Н.Ф., Петрухина В.И., Сморгонский А.В. Ультрарелятивистский карсиноотрон // Радиотехника и электроника, 1975, т.20, вып.7, с.1547-1550.
16. Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ // Изв. Вузов. Радиофизика, 1978, т.21, вып.7, с.1037-1052.
17. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков в 2т. // М: Физматлит, 2003, 496с. и 647с.
18. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны // М.: Сов. Радио, 1957, 580с.
19. Ginzburg N.S., Malkin A.M., Sergeev A.S., Zaslavsky V.Yu. Quasi-optical theory of relativistic submillimeter surface-wave oscillators // Appl. Phys. Lett., 2011, V.99, p.121505.
20. Бердник С.Л., Пенкин Д.Ю., Катрич В.А., Пенкин Ю.М., Нестеренко М.В. Использование концепции поверхностного импеданса в задачах электродинамики (75 лет спустя) // Радиофизика и радиоастрономия, 2014, т.19, вып.1, с.57-80.
21. Аркадакский С.С., Цикин Б.Г. Уравнение возбуждения электронным потоком волноведущей системы с импедансной границей // В кн.: Лекции по электронике СВЧ (3-я зимняя школа-семинар инженеров), Саратов: СГУ, 1974, кн.3, с.130-165.
22. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Основы электродинамики плазмы // М.: Высшая школа, 1988, 424с.
23. Zayats A.V., Smolyaninov I.I., Maradudin A.A. Nano-optics of surface plasmon polaritons // Physics Reports, 2005, 408, p.131–314.
24. Neil V.K., Sessler A.M. Longitudinal resistive instabilities of intense coasting beams in particle accelerators // Review of Scientific Instruments, 1965, V.36, №4, p.429-436.
25. Uhm H.S. A self-consistent nonlinear theory of resistive-wall instability in a relativistic electron beam // Phys. Plasmas, 1994, 1 (6), p.2038-2052.
26. Богданкевич Л.С., Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Плазменная СВЧ электроника // УФН, 1981, т.133, вып.1, с.3-32.
27. Ginzburg N.S., Novozhilova Yu.V., Zotova I.V., Sergeev A.S., Peskov N.Yu., Phelps A.D.R., Wiggins S.M., Cross A.W., Ronald K., He W., Shpak V.G., Yalandin M.I., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R., Tarakanov V.P. Generation of powerful subnanosecond microwave pulses by intense electron bunches moving in a periodic backward wave structure in the superradiative regime // Phys. Rev. E, 1999, 60 (3), p.3297-3304.
28. Korovin S.D., Eltchaninov A.A., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V. Generation of Cherenkov superra-

- diance pulses with a peak power exceeding the power of the driving short electron beam // *Phys. Rev. E*, 2006, **74** (1), p.016501-016508.
29. Гуревич А.В., Литвак А.Г., Вихарев А.Л., Иванов О.А., Борисов Н.Д., Сергейчев К.Ф. Искусственная ионизованная область как источник озона в стратосфере // *УФН*. 2000. т.170, №11. с.1181-1202.
 30. Oserchuk J.M. Microwave power applications // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, V.50, №3, p.975-985.
 31. West P.R., Ishii S., Naik G.V., Emani N.K., Shalaev V.M., Boltasseva A. Searching for better plasmonic materials // *Laser Photonics Rev.*, 2010, 4, No.6, p.795–808.
 32. Фок В.А. Законы отражения Френеля и законы дифракции // *УФН*, 1948, т.36, вып.3, с.308-327.
 33. Абубакиров Э.Б. Усиление и генерация микроволн релятивистскими электронными пучками в секционированных системах // *Докторская диссертация*. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2007.

Список публикаций автора по теме диссертации

1а. Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Малкин А.М., Сергеев А.С., Заславский В.Ю., Железнов И.В. Терагерцовое сверхизлучение протяженного электронного сгустка, движущегося над гофрированной поверхностью // *Письма в ЖТФ*, 2012, т.38, вып.20, с.78-87.

2а. Ginzburg N.S., Malkin A.M., Sergeev A.S., Zotova I.V., Zaslavsky V.Yu., Zheleznov I.V. 3D Quasioptical Theory of Terahertz Superradiance of an Extended Electron Bunch Moving Over a Corrugated Surface // *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110, 184801.

3а. Ginzburg N.S., Malkin A.M., Zheleznov I.V., Sergeev A.S. Evanescent waves propagation along a periodically corrugated surface and their amplification by relativistic electron beam (quasi-optical theory) // *Phys. Plasmas*, 2013, 20, 063105.

4а. Гинзбург Н.С., Малкин А.М., Железнов И.В., Заславский В.Ю., Сергеев А.С. Стимулированное черенковское излучение релятивистского электронного пучка, движущегося над периодически-гофрированной поверхностью (квазиоптическая теория) // *ЖЭТФ*, 2013, т.144, вып.6, с.1115-1128.

5а. Гинзбург Н.С., Малкин А.М., Заславский В.Ю., Железнов И.В., Сергеев А.С., Зотова И.В. Квазиоптическая теория релятивистских черенковских генераторов и усилителей // *Изв. Вузов. Радиофизика*, 2013, т.56, вып.8-9, с.562-588.

6а. Гинзбург Н.С., Малкин А.М., Железнов И.В., Сергеев А.С., Зотова И.В. Квазиоптическая теория усиления излучения электронным потоком, движущимся над металлической резистивной поверхностью // *Письма в ЖТФ*, 2013, т.39, вып.2, с.52-60.

7а. Гинзбург Н.С., Малкин А.М., Железнов И.В., Сергеев А.С., Кочаровская Е.Р. Усиление релятивистским электронным потоком поверхностной волны, распространяющейся над гофрированной структурой // Письма в ЖТФ, 2013, т.39, вып.6, с.50-59

8а. Гинзбург Н.С., Малкин А.М., Железнов И.В., Сергеев А.С., Кочаровская Е.Р. Распространение волн в сверхразмерных планарных волноводах со слабогофрированной поверхностью // Радиотехника и электроника, 2014, т.59, вып.12, с.1246-1254.

9а. Ginzburg N.S., Malkin A.M., Sergeev A.S., Zheleznov I.V., Zotova I.V., Zaslavsky V.Yu., Boltachev G.Sh., Sharypov K.A., Shunailov S.A., Ul'masculov M.R., Yalandin M.I. Generation of Subterahertz Superradiance Pulses Based on Excitation of a Surface Wave by Relativistic Electron Bunches Moving in Oversized Corrugated Waveguides // Phys. Rev. Lett., 2016, 117, 204801.

10а. Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Железнов И.В., Зотова И.В., Малкин А.М., Сергеев А.С., Кочаровская Е.Р., Яландин М.И. Механизмы черенковского сверхизлучения протяженных электронных сгустков в сверхразмерных гофрированных волноводах // Изв. Вузов. Радиофизика, 2016, т.59, вып.6, с.509-519.

11а. Гинзбург Н.С., Малкин А.М., Железнов И.В., Сергеев А.С., Кочаровская Е.Р. Квазиоптическая теория усиления релятивистским электронным потоком поверхностных волн, распространяющихся над гофрированными структурами (импедансное приближение) // ЖТФ, 2016, т.86, вып.11, с.6-15.

12а. Гинзбург Н.С., Малкин А.М., Заславский В.Ю., Железнов И.В., Сергеев А.С. Генерация коротковолнового излучения ленточными релятивистскими электронными пучками в режиме возбуждения поверхностных волн // Радиотехника и электроника, 2016, т.61, вып.5, с.451.

13а. Гинзбург Н.С., Малкин А.М., Железнов И.В., Сергеев А.С., Кочаровская Е.Р. Усиление коротковолнового излучения на основе резистивной неустойчивости релятивистского электронного потока (квазиоптическая теория) // ЖТФ, 2017, т.87, вып.8, с.1230-1237.

14а. Ginzburg N.S., Malkin A.M., Zheleznov I.V., Sergeev A.S. Quasi-optical theory of relativistic submillimeter Cherenkov amplifier and oscillator // Proceedings of 38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Mainz, Germany, 1-6 September, 2013, 6665490.

15а. Гинзбург Н.С., Железнов И.В., Заславский В.Ю., Зотова И.В., Малкин А.М., Сергеев А.С. Квазиоптическая теория релятивистских коротковолновых черенковских генераторов и усилителей // Труды всероссийской научной конференции «Проблемы СВЧ-электроники», Москва, 24-25 октября, 2013, с.39-42.

16а. Ginzburg N.S., Zheleznov I.V., Malkin A.M., Sergeev A.S., Zotova I.V., Yalandin M.I. Terahertz superradiance of an extended electron beams in the sur-

face-wave excitation mode // Proceedings of 40th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Hong Kong, China, 23-28 August, 2015, 7327464.

17а. Гинзбург Н.С., Малкин А.М., Зотова И.В., Железнов И.В., Заславский В.Ю., Сергеев А.С., Шарыпов К.А., Шунайлов С.А., Ульмаскулов Р.М., Яландин М.И. Генерация импульсов сверхизлучения при возбуждении электронным пучком поверхностных волн в сверхразмерных гофрированных волноводах // Труды всероссийской научной конференции «X всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн», Н. Новгород, 26 февраля - 3 марта, 2016, с.59-60.

18а. Malkin A.M., Ginzburg N.S., Zheleznov I.V., Sergeev A.S. Amplification of short-wavelength radiation by relativistic electron beams moving near the impedance surfaces // Proc. of 10th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”, N. Novgorod – Moscow, 17-22 July, 2017, p.273-274.

Железнов Илья Владимирович

**КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
СТИМУЛИРОВАННОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ И СГУСТКОВ
В СВЕРХРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Автореферат

Подписано к печати 16.10.2018.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ № 73 (2018).

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