

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИСЭ СО РАН,
Академик РАН

Н. Ратахин Ратахин Н.А.

«26» ноября 2018

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Железнова Ильи Владимировича

«КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

СТИМУЛИРОВАННОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ И СГУСТКОВ В
СВЕРХРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.03 – радиофизика

Актуальность темы исследования

Тематика диссертационной работы Железнова И.В. связана с исследованием стимулированного черенковского излучения релятивистских электронных пучков, которое широко используется в релятивистской электронике для создания генераторов и усилителей высокого уровня мощности в различных диапазонах. Вместе с тем, по-прежнему остается актуальной задача дальнейшего повышения мощности излучения (до мультигиваттного уровня) в уже освоенном сантиметровом диапазоне и продвижения релятивистских электронных генераторов в коротковолновые диапазоны вплоть до субмиллиметрового. Очевидно, решение указанных задач требует использования сверхразмерных или открытых электродинамических систем. В этом случае эффективны квазиоптические методы описания электронно-волнового взаимодействия, развитию которых посвящена диссертация. В работе, в рамках квазиоптического приближения исследован ряд схем релятивистских усилителей поверхностной волны, возбуждаемых пучком при движении над различными импедансными поверхностями, включая периодически гофрированную поверхность, поверхность раздела плазма-вакуум, а также границу металла с конечной проводимостью. Значительное внимание в работе уделено развитию теории многоволновых черенковских генераторов. Здесь, с одной стороны,

продемонстрирована эффективность развиваемого похода при моделировании известных экспериментов, проведенных с мощными МВЧГ в сантиметровом диапазоне, а другой – показана перспективность продвижения этого класса генераторов в коротковолновую часть миллиметрового диапазона. Плодотворность развиваемого квазиоптического подхода продемонстрирована также проведенным в работе моделировании эксперимента, в котором впервые наблюдалось возбуждение поверхностных волн в сверхизлучательном режиме.

Оценка содержания работы, ее завершенности

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка, а также одного приложения. Работа представлена на 159 страницах и содержит 54 иллюстрации. Библиографический список включает в себя 110 наименований.

Во введении формулируется цель и задачи диссертационной работы; обосновывается их актуальность; перечисляются новизна и практическая ценность работы.

Первая глава посвящена построению квазиоптической модели усилителей, основанных на конвективной неустойчивости электронных пучков, движущихся прямолинейно 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. Для указанного достаточно широкого класса усилителей построены линейная и нелинейная теории, позволяющие определить как коэффициенты усиления, так и эффективность энергообмена.

Во второй главе 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 этой основе продемонстрирована перспективность реализации генераторов указанного типа в миллиметровом диапазоне.

В третьей главе 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».

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Таким образом, можно заключить, что работа хорошо выстроена логически, грамотно изложена, а материал соответствует специальности 01.04.03 – радиопизика.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме

Содержание диссертации полностью отвечает заявленной специальности и теме.

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Автореферат диссертации в полной мере отражает её содержание.

Личный вклад соискателя в получении результатов исследования

В ответах на вопросы автор показал компетентность и высокую квалификацию, не оставив никаких сомнений в авторстве защищаемых положений и выводов. Автор принимал участие в развитии квазиоптических методов для описания приборов черенковского типа, численном моделировании в рамках усредненных моделей, оценке и оптимизации параметров, а также физической интерпретации результатов. Тем не менее, очевидно, что диссертация Железнова И.В. является частью работы коллектива исследователей, о чём свидетельствует большое число соавторов в публикациях соискателя.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Развиваемый автором теоретический подход и следующие из него научные положения, выводы и рекомендации относительно разработки мощных релятивистских черенковских усилителей и генераторов поверхностной волны чётко сформулированы и обоснованы в тексте диссертации. Полученные результаты хорошо известны научной общественности, опубликованы в авторитетных российских и международных журналах, докладывались на различных научных конференциях. Большинство результатов, полученных на основании приближенной квазиоптической теории подтверждено результатами моделирования в рамках прямых PIC кодов. Важным критерием, подтверждающим достоверность результатов работы, является весьма нетривиальный предельный переход к известным уравнениям, описывающим релятивистскую ЛОВ в приближении фиксированной поперечной структуры поля.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы обусловлена развитием методов описания черенковского излучения прямолинейных релятивистских электронных потоков в сверхразмерных электродинамических системах. Продуктивность такого подхода уже получила экспериментальное подтверждение в экспериментах, где, на основе развитой теории, получены импульсы излучения с рекордной для коротковолновой части миллиметрового диапазона мощностью. Таким образом, практическая значимость работы обусловлена ее направленностью на реализацию новых схем мощных и сверхмощных релятивистских усилителей и генераторов в широком диапазоне длин волн (от сантиметрового до субмиллиметрового). Указанные источники обладают значительным потенциалом с точки зрения их последующего использования в короткоимпульсной радиолокации, системах электронного противодействия, нетепловом воздействии электромагнитных импульсов на различные среды, фотохимии, медицине.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты и выводы диссертации Железнова И.В., полученные при исследовании усиления и генерации РЭП при возбуждении поверхностных волн в сверхразмерных электродинамических системах, полезны для разработки сверхмощных усилителей и генераторов, ведущихся в ИСЭ СО РАН, ИЭФ УрО РАН, ИОФ СО РАН, а также в ряде институтов Росатома. Кроме того, ряд теоретических результатов могут представлять интерес при разработке учебных курсов по специальности «вакуумная электроника».

Оценка новизны и научной ценности результатов исследований

Проведенные исследования характеризуются безусловной новизной используемого квазиоптического подхода. Развита универсальная квазиоптическая модель, описывающая усиление коротковолнового излучения РЭП, движущимися над различными импедансными поверхностями, включая поверхности идеального металла с периодической гофрировкой, металла с конечной проводимостью и полуограниченной изотропной плазмы. Исследовано влияние полей высокочастотного пространственного заряда на структуру возбуждаемых поверхностных волн и инкременты неустойчивости. 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. Проведенный в диссертационной работе теоретический анализ позволил в ИЭФ Уро РАН провести 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.

Замечания по диссертационной работе

(1) При анализе дисперсионного уравнения 2.48 автор подходит, на наш взгляд, излишне формализовано, привлекая понятие «опорной волны», которое не поясняется и вряд ли физически обосновано. Возможно, решения отыскиваются последовательными приближениями, когда в нулевом приближении используется соответствующая по радиальному индексу волна регулярного волновода. Но тогда, красные линии на рис. 2.2а для симметричных волн с радиальными индексами 2 и 3, когда «опорной» выбрана волна E_{01} , выглядят абстрактно и не имеют смысла. Рисунок 2.2б исправляет ситуацию, но вместо того, чтобы им ограничиться автор говорит про улучшение точности. Здесь же поясняются области применимости квазиоптического приближения, отмеченные серым цветом, но нет уточнений относительно выбранного критерия для нахождения этих областей: ссылка на два строгих неравенства 2.42 представляется не конкретной.

(2) Объясняя мотивацию перехода к сверхразмерным замедляющим структурам в освоении эффективных режимов сверхизлучения, особенно в миллиметровом диапазоне волн, автор упоминает: и облегчение юстировки электронных пучков, и возможность повышения его тока, и даже снижение омических потерь. Но опускается из виду, как и во всей диссертации, роль возможной дисперсии групповой скорости волн, возбуждаемых в конечной полосе частот, - на практике, порядка 10%. Учёт данного фактора, особенно вблизи верхней границы полосы пропускания низшей моды, является уже давно актуальным и мог бы заметно украсить диссертацию. Данное замечание можно было бы счесть как пожелание на будущее. Однако, судя по тексту на стр. 128, автор, видимо, не в курсе, что замедляющие структуры с фактором $D/\lambda \leq 1$ не могли показать конверсию мощности сверхизлучения в системе «пучок-волна» более 40-50% в силу значительного расплывания волнового пакета для ограниченной полосы пропускания таких гофрированных волноводов. С ростом полосы пропускания для $D/\lambda \approx 1.3$ в работе [81] и выше в более поздних работах конверсия возросла до значений более 100%.

Заключение по диссертации о соответствии её требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней» по п. 9 и 10

В целом диссертация Железнова И.В. является научно-квалификационной работой, которая вносит существенный вклад в теоретическое описание на основе оригинального квазиоптического похода черенковского излучения релятивистских электронных пучков в сверхразмерных электродинамических системах.

Диссертация отвечает требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, утверждённого постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. № 842, а её автор Железнов Илья Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Диссертационная работа рассмотрена на расширенном научном заседании отдела физической электроники ИСЭ СО РАН 23 ноября 2018 года, протокол № 1.

Заведующий отделом физической
электроники ИСЭ СО РАН,
доктор физико-математических наук



В. В. Ростов

Подпись Ростова В.В. заверяю
Ученый секретарь ИСЭ СО РАН, д.ф.-м.н.



И. В. Пегель

Ростов Владислав Владимирович,
доктор физико-математических наук,
01.04.04 – Физическая электроника
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЭ СО РАН)

Адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3
Тел. (3822) 491-641
E-mail: rostov@lfe.hcei.tsc.ru