

ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертации **Булейко Аллы Борисовны**

на тему:

«Плазменные релятивистские СВЧ-усилители шума»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, по специальности 1.3.9 – Физика плазмы

В последние годы растёт интерес к созданию мощных источников СВЧ-излучения, примером которых является релятивистский плазменный мазер, обладающий уникальными характеристиками излучения. Этот прибор имеет возможность генерировать мощные микроволновые импульсы и при этом изменять частоту излучения каждого импульса в диапазоне 2...3 октавы. Поэтому исследования процессов функционирования таких устройств, их физических и технических характеристик являются важной и актуальной задачей, имеющей практическое значение.

С использованием разных типов и конструкций ускорителей, рассмотренных в диссертации, А.Б. Булейко получен ряд новых важных результатов:

- экспериментально продемонстрирован плазменный мазер с инверсной конфигурацией, т.е. с плазмой внутри электронного пучка, в полосе частот от 3 до 9 ГГц в режиме автогенерации и в полосе от 3 до 15 ГГц в режиме усиления шумов;
- экспериментально измерен погонный коэффициент усиления плазменной волны релятивистским электронным пучком, равный $0.1-0.2 \text{ см}^{-1}$;
- предложена методика и измерен уровень начального шума, усиливаемого электронным пучком в плазме мазера;
- экспериментально продемонстрировано эффективное усиление СВЧ-шума при плазменно-пучковом взаимодействии без применения СВЧ-поглотителей за счет малой длительности импульса тока;
- достигнуто и экспериментально продемонстрировано СВЧ-излучение при плазменно-пучковом взаимодействии с электронным КПД 26% по энергии импульса и почти 100% по пиковой мощности.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для создания источников СВЧ-импульсов гигаваттного уровня мощности с длительностью до нескольких наносекунд и частотой, перестраиваемой в полосе 2...3 октавы до десятков ГГц и электронным КПД по энергии импульса не менее 25%.

Текст диссертации состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 83 источника.

Во введении подчеркивается актуальность тематики диссертационной работы, сформулированы цели исследования, поставлены научные задачи, описана научная новизна, практическая ценность результатов, сформулированы защищаемые положения, даны сведения об апробации работы, представлена структура диссертации.

Первая глава посвящена исследованию работы плазменного лазера с инверсной конфигурацией, т.е. устройства с транспортировкой электронного потока снаружи от плазмы, а не внутри, как в большинстве плазменных лазеров. Такая конфигурация лазера, во-первых, оптимальна при более высоких токах электронного пучка и мощностях излучения и, во-вторых, ориентирована на импульсно-периодический режим работы, поскольку значительно облегчает охлаждение коллектора электронов, в качестве которого выступает внешний электрод коаксиального волновода. Для такой конфигурации был впервые экспериментально продемонстрирован плазменный лазер с полосой электронной перестройки частоты излучения от импульса к импульсу в диапазоне от 3 до 9 ГГц при мощности 20 МВт.

Во второй главе экспериментально рассматривались возможность и условия смены режима работы плазменного лазера от автогенератора к усилителю шума и обратно. Эксперименты проводились на базе ускорителя с длительностью импульса 45 нс. Подавление обратной связи и работу плазменного лазера в режиме усиления шума обеспечивали СВЧ-поглотители, как это обычно делается при построении СВЧ-усилителей. Впервые была экспериментально решена задача измерения погонного коэффициента усиления электронным пучком плазменной волны, который ранее только рассчитывался. Эти результаты позволили оценить длину плазменно-пучкового взаимодействия лазера, необходимую для работы в качестве усилителя шума с мощностью, близкой к уровню насыщения.

В третьей главе представлены результаты исследования плазменного лазера, позволившие впервые экспериментально продемонстрировать эффективное усиление СВЧ-шума при плазменно-пучковом взаимодействии за счет достаточно короткого импульса тока без применения СВЧ-поглотителей. В этой серии экспериментов использовался источник электронов с длительностью импульсов тока РЭП 2,5 нс и мощностью 450 МВт (270 кэВ, 1,7 кА). В результате измерений впервые были получены значения мощности начальных шумов, которые в дальнейшем усиливаются в процессе плазменно-пучкового взаимодействия. Разработанный плазменный лазер излучал усиленный шум в зависимости от концентрации плазмы в диапазоне от 3 до 25 ГГц со средней мощностью ~100 МВт и импульсной мощностью, достигающей до мощности электронного потока.

В заключении сформулированы основные выводы по проведенным в диссертационной работе исследованиям.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается согласием экспериментальных результатов с численными расчетами и имеющимися литературными данными, использованием современного экспериментального оборудования, а также применением современных методов обработки экспериментальных данных.

По теме диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых российских и зарубежных журналах, цитируемых в международных базах данных Web of Sciences и Scopus, результаты диссертации неоднократно докладывались на всероссийских и международных научных конференциях.

В целом диссертационная работа Булейко А.Б. выполнена на достаточно высоком научном уровне, в ней получен большой объем новых и важных результатов, достоверность которых не вызывает сомнений.

В качестве замечаний можно отметить следующее:

1. Уже в начале текста работы имеется неточность - утверждается, что первый плазменный генератор был создан 1982 г. Это неверно. Видимо, речь идет о релятивистском генераторе. Плазменные генераторы разрабатывались ранее, в частности, и в ИРЭ АН СССР. Жаль, что в работе нет соответствующей ссылки.
2. Следует также отметить, что нет отдельной главы с обзором литературы, что позволило бы более четко сопоставить полученные результаты с известными.
3. Физическая интерпретация механизма работы плазменных генераторов изложена несколько запутанно. Автору следовало бы более пространно описать близкие механизмы работы вакуумных СВЧ приборов, тогда особенности работы плазменных устройств выглядели бы более ясно. Например, взаимодействие электронного пучка с поверхностной волной неперiodических электродинамических систем давно известно в вакуумной электронике. Достаточно назвать приборы с импедансной стенкой.
4. В целом в работе мало ссылок на работы по релятивистской вакуумной электронике даже по основной идее диссертации - усилению волны при входном коротком импульсе, когда не возникает обратная связь. Можно было бы сослаться, например, на работы М.И. Яландина с коллегами. Сравнение же с генераторами СШП импульсов следовало бы исключить из текста работы, как не имеющее прямого отношения к плазменной электронике.
5. Экспериментальная часть работы изложена чрезмерно кратко, что затрудняет анализ конкретных количественных результатов. Так пиковая мощность генерации в одном из экспериментов превосходит мощность электронного пучка (соответственно 450 МВт и 500 МВт). В вакуумной электронике это возможно. Но там есть

соответствующая интерпретация. В диссертации её нет. Усредненная мощность измерялась калориметром. Причем, отсутствует информация о калибровке калориметра, решения проблем согласования с падающим излучением и другие детали эксперимента, поэтому точность заявленного в работе КПД (~ 26 %) неясна.

Несмотря на отмеченные замечания общий уровень диссертационной работы достаточно высок. Диссертант показала хорошее владение экспериментальными методами плазменной СВЧ-электроники. Результаты работы хорошо известны научной общественности. Автореферат правильно и полно отражает содержание работы, основные ее выводы соответствуют тексту диссертации.

Таким образом, диссертационная работа Булейко Аллы Борисовны на тему: «Плазменные релятивистские СВЧ-усилители шума», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, по специальности 1.3.9 – Физика плазмы, является завершенной научной квалификационной работой, в которой содержится решение важной задачи современной плазменной релятивистской СВЧ-электроники по созданию мощных сверхширокополосных источников электромагнитного излучения.

По актуальности, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов диссертационная работа А.Б. Булейко соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор А.Б. Булейко заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Официальный оппонент

ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)



Вдовин Владимир Александрович

19.11.2021 г.

Адрес: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 7, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Телефон: +7(495)6293403

Электронная почта: vdv@cplire.ru

Ученая степень: кандидат физико-математических наук

Отзыв к.ф.-м.н. Вдовина В.А. удостоверяю:

Ученый секретарь ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

к.ф.-м.н.



И.И. Чусов