

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИСЭ СО РАН
д.ф.-м.н.




И. В. Романченко

« 18 » ноября 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Булейко Аллы Борисовны «Плазменные релятивистские СВЧ-усилители шума», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Диссертационная работа Булейко А. Б. представлена на 82 страницах, содержит 27 рисунков и список литературы из 83 наименований. Работа включает введение, три главы и заключение.

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию генерации мощного импульсного СВЧ-излучения в релятивистских плазменных генераторах и усилителях с сильноточным электронным пучком. В работе поставлены следующие цели: продемонстрировать генерацию СВЧ-излучения с перестройкой частот в широкой полосе плазменным мазером с инверсной конфигурацией; измерить погонный коэффициент усиления плазменной волны и мощность усиливаемых начальных шумов; продемонстрировать усиление шума при плазменно-пучковом взаимодействии с подавлением обратной связи СВЧ-поглотителями и смену режима работы (усилитель шума – автогенератор), а также усиление шума при подавлении обратной связи за счет малой длительности импульса электронного пучка.

Тематика диссертации относится к плазменной электронике, а именно, к исследованию процессов генерации мощных СВЧ-импульсов с большой спектральной шириной и/или широкополосной перестройкой частоты излучения и разработке соответствующих источников излучения. Эта тематика является актуальной; она присутствует в Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы), относится к приоритетному направлению 1.3.4. Физика плазмы (раздел 1.3.4.4. Физика плазменных устройств) и направлению 1.3.6. Радиофизика и электроника, акустика (разделы 1.3.6.1. Когерентные источники микроволнового излучения и их применение; 1.3.6.2. Развитие методов генерации, усиления, преобразования и приема электромагнитных волн; 1.3.6.6. Наносекундная электроника больших мощностей и ее применение).

Актуальность решаемых в диссертации задач связана с потребностью в совершенствовании характеристик (в первую очередь, расширении спектра и диапазона управления частотой излучения) плазменных релятивистских СВЧ-генераторов и усилителей дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн, практическое применение которых связано с их использованием как источников мощного широкополосного излучения в исследованиях по электромагнитной совместимости, а также в междисциплинарных исследованиях в области биологии и медицины.

Из полученных в диссертации результатов отметим следующие, на наш взгляд, основные результаты, обладающие новизной и научной ценностью для плазменной электроники сверхвысоких частот, которая состоит в демонстрации новых возможностей плазменных СВЧ-генераторов с релятивистскими электронными пучками и развитии представлений о физических процессах в таких устройствах:

- Экспериментально продемонстрировано излучение плазменного мазера с инверсной конфигурацией (с плазмой внутри электронного пучка), в полосе частот от 3 до 9 ГГц в режимах автогенерации и в полосе от 3 до 15 ГГц в режиме усиления шумов.

- Измерен погонный коэффициент усиления плазменной волны релятивистским электронным пучком ($0,1-0,2 \text{ см}^{-1}$).

- Продемонстрировано эффективное усиление шумоподобного СВЧ излучения при плазменно-пучковом взаимодействии, достигаемое за счет малой длительности импульса тока электронного пучка.

- Получены импульсы излучения с рекордной для плазменных СВЧ-генераторов эффективностью преобразования мощности электронного пучка в мощность СВЧ-излучения. Этот результат, полученный с использованием компактного ускорителя электронов РАДАН с малой длительностью импульса, говорит в пользу того, что общая концепция генерирования коротких СВЧ-импульсов с экстремально высокой мощностью эффективно за счет использования нестационарных электронно-волновых процессов применима и к СВЧ-генераторам с плазменными замедляющими системами.

Все основные результаты получены экспериментальными методами.

Выводы, сделанные в диссертационной работе, следует использовать и учитывать при разработке конструкций мощных широкополосных плазменных генераторов и усилителей СВЧ-диапазона. Результаты работы могут быть непосредственно использованы для создания эффективных источников наносекундных субгигаваттных СВЧ-импульсов сантиметрового диапазона длин волн, перестраиваемых по частоте на 2–3 октавы.

Результаты диссертации могут быть использованы в организациях, ведущих исследования и разработку сверхмощных импульсных СВЧ-генераторов: Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Институт сильноточной электроники СО РАН, Институт прикладной физики РАН, Институт электрофизики УрО РАН. В перспективе разработка на основе результатов диссертационной работы новых мощных широкополосных импульсных источников СВЧ-излучения будет способствовать реализации приоритетов Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: (а) – в части перехода к новым способам конструирования; (б) – в части формирования новых источников энергии; (д) – в части противодействия терроризму.

Материалы диссертации полноценно опубликованы и апробированы. Имеется 6 статей в рецензируемых научных журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук или индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus. Сделано 8 докладов на профильных международных, всероссийской, молодежной научных конференциях. Полный список публикаций с учетом тезисов и материалов докладов включает 14 позиций.

Автореферат диссертации должным образом отражает ее содержание.

Достоверность и обоснованность научных результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается использованием проверенных экспериментальных методик, принятых в высокочастотной электронике и плазменной электронике, а также имеющимся согласием результатов проведенных экспериментов с известными теоретическими представлениями и результатами численных расчетов.

К диссертационной работе имеется ряд замечаний.

1. Представляется не вполне удачной формулировка защищаемых положений, которые не доведены до самостоятельной формы. Присутствуют нестрогие выражения (в первом положении: «на примерно одинаковом мегаваттном уровне мощности», в четвертом положении: «почти 100%»), зависимость от персонального контекста (в третьем положении: «... существенно больше результатов других авторов») и от исторического контекста (в четвертом положении: «... кратно превышает все предыдущие экспериментальные достижения»). В четвертом положении величина КПД приведена с точностью до двух значащих цифр (26 %), в то время как средняя за импульс мощность здесь же определена как «порядка 100 МВт».

2. В диссертации экспериментально продемонстрирована возможность построения мощного широкополосного плазменного мазера с инверсной конфигурацией. Отмечается, что «ранее инверсная схема построения мазера не смогла продемонстрировать перестройки частот излучения в широком диапазоне». Однако автор диссертации не анализирует, чем были вызваны предыдущие неудачи, и не поясняет, какие именно физические и технические решения позволили ему достичь успеха.

В частности, на наш взгляд, говоря о различиях между обычной (пучок внутри плазмы) и инверсной (пучок снаружи) конфигурациями плазменного мазера, нельзя обойти вниманием следующее обстоятельство. В обычной конфигурации рабочий электронный пучок осаждается на торец внутреннего электрода выходной коаксиальной линии. В осаждаемом пучке присутствует остаточная высокочастотная модуляция тока, и она может быть значительной. Таким образом, на краю электрода имеется высокочастотный источник, порождающий электромагнитную волну, уходящую в линию. Эта волна складывается с волной, генерируемой в плазменной части генератора. Сложение этих волн, если оно оптимально, способно повысить эффективность прибора. В инверсной же конфигурации пучок осаждается на внешний электрод, и дополнительного источника ВЧ тока на внутреннем электроде нет (зато присутствует несинхронное взаимодействие пучка, не утратившего до конца группировку, с интенсивной волной в зазоре коаксиальной линии на каком-то протяжении до места высадки пучка). Автор диссертации об этих особенностях никак не упоминает; неясно, принимались ли они во внимание при оптимизации прибора.

3. В работе не проводилось прямых измерений концентрации плазмы, создаваемой его источником с СВЧ-генераторе. Автор диссертации объясняет это тем, что «при наличии мощного СВЧ-излучения, рентгеновского излучения от коллектора РЭП и интенсивного света от взрывоэмиссионного катода не работают традиционные методы диагностики плазмы. Поэтому регистрация спектра мощного СВЧ-излучения и сравнение его с численными расчетами – единственный способ оценить плотность плазмы в эксперименте.». Концентрация плазмы определялась в условных единицах, причем считалось, что она пропорциональна току в источнике плазмы. По нашему мнению, в работе всё же следовало бы привести результаты прямой калибровки плазменного источника. Такую калибровку вполне можно было бы произвести без включения электронного ускорителя, чтобы избежать перечисленных выше помех.

4. На рис. 3.9 показана зависимость от времени мощности СВЧ-излучения. Эта кривая, во-видимому, получена путем квадратичного детектирования сигнала со штыревой антенны, пропорционального напряженности электрического поля излучения. Если это так, то частота следования пиков на графике есть удвоенная частота колебаний поля, а локально усредненные (по периоду колебаний) значения мощности равны половине от амплитудных значений. В общепринятой практике измерений мощности СВЧ-импульсов (во всяком случае, содержащих порядка 10 или более колебаний) локальные значения мощности определяются именно как усредненные по периоду колебания. Поэтому представляется, что «пиковая мощность» на рис. 3.9 составляет не 450 МВт, как утверждается в диссертации, а половину от этого значения. В этой связи и величина «КПД почти 100% по пиковой мощности», фигурирующая в четвертом защищаемом положении, должна быть вдвое

уменьшена: впрочем, получающаяся величина в 50% всё еще весьма велика и это можно считать достижением.

5. На схеме плазменного автогенератора СВЧ-излучения с инверсной конфигурацией (рис. 1.1), а также на схеме плазменного релятивистского усилителя шума (рис. 3.3) изображен взрывоэмиссионный катод дискового типа. Судя по рисунку, катод находится в гладкой части анодной трубы, а катододержатель левее катода не имеет расширения, которое формировало бы отражающий потенциальный барьер. Поэтому, казалось бы, электронный пучок от кромки катода должен идти и в положительном, и в отрицательном направлении. Неясно, почему на рисунке изображен электронный пучок, распространяющийся от кромки катода только вправо. Также неясно, существовал ли обратный электронный ток в эксперименте и было ли это учтено при расчете КПД прибора.

6. На рис. 1.2, где раздельно показаны импульсы тока и напряжения ускорителя электронов Терек-2, разным образом выбранные нулевые отсчеты времени не позволяют судить о степени синхронности импульсов. Более информативным было бы совместное изображение импульсов с общей временной шкалой.

7. В комментариях к рис. 1.7, на котором показано изменение мощности СВЧ-импульса во времени, говорится о длительности импульса по полувысоте 20 нс. В действительности это не так. На рисунке отчетливо видно, что указанная длительность соответствует значительно меньшему уровню мощности, примерно 1/6 от максимума. Неясно, за какой интервал времени производится усреднение при определении «средней мощности».

8. В диссертации экспериментально измеренные величины приведены без указания погрешности измерений, при этом автор активно использует знак грубого равенства (\sim). Из всех рисунков, представляющих серии результатов измерений, лишь рис. 3.10 содержит доверительные интервалы.

9. Имеются замечания к терминологии. Используется устаревший термин «диэлектрическая постоянная» (вместо «электрическая постоянная») Представляется неуместным использование, пусть даже иносказательное, в научной работе по физике термина из другой научной отрасли – биологии («симбиоз», на стр. 4). Стиль изложения местами весьма вольный, например: «мировые константы», «длина взаимодействия» (вместо «длина области взаимодействия»), «созданный мазер использовал...», «мазер-усилитель... излучает... полосу частот», «усиление магнитного поля и отдельный напуск газа вместе с осциллографом и кабелями, предназначенными для более высоких частот, выходили за рамки настоящих экспериментов», и т.п.

10. Имеются замечания по оформлению диссертации в соответствии с ГОСТ. В тексте имеются опечатки, например, на стр. 6, 71 читаем «пламенный» вместо «плазменный». В качестве десятичного разделителя использованы точки наряду с запятыми, для указания диапазонов – тире наряду с многоточиями. Присутствуют ненужные сокращения («напр.» на стр. 27, 40, 53 наряду с «например» в остальном тексте). Есть погрешности в компоновке документа. Некоторые рисунки не отделены от текста. Рисунки 1.5 и 3.11, содержащие по несколько графиков, разнесены на несколько страниц без указания на продолжение. В разделе «Структура и объем диссертации» неверно указано количество рисунков 25 (фактически – 27). При этом имеются рис. 1 и рис. 2 во введении и одновременно с этим рис. 1.1 – рис. 1.7 в главе 1 и рис. 2.1 – рис. 2.7 в главе 2, что вызывает некоторое замешательство. В оглавлении не отражен список литературы.

Перечисленные замечания, которые диссертанту необходимо учесть в дальнейших исследованиях, не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. В этой работе экспериментальные исследования плазменных СВЧ-источников с релятивистскими электронными пучками получили значительное продвижение. Результаты, полученные А. Б. Булейко, вносят существенный вклад в плазменную релятивистскую высокочастотную электронику. Можно заключить, что диссертационная работа А. Б. Булейко «Плазменные релятивистские СВЧ-усилители шума» представляет собой законченное исследование актуальной научной задачи в области генерации мощного импульсного СВЧ-излучения с

помощью плазменных устройств. Ведущая организация считает, что работа выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а диссертант Булейко Алла Борисовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

Ведомственная принадлежность: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

ОГРН 1027000871666, ИНН 7021001375, КПП 701701001, ОКПО 05160369, ОКОГУ 15066, ОКАТО 69401000000, ОКВЭД 73.10, ОКФС 12, ОКОПФ 72, ОКТМО 69701000.

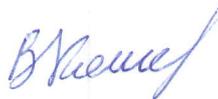
Адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, д. 2/3.

Тел. (3822)49-15-44, факс (3822)49-24-10, адрес эл. почты: contact@hcei.tsc.ru.

Официальный сайт: <http://www.hcei.tsc.ru>.

Отзыв ведущей организации подготовили:

главный научный сотрудник
лаборатории высокочастотной электроники
д.ф.-м.н.



В. И. Кошелев

главный научный сотрудник
лаборатории теоретической физики
д.ф.-м.н.



И. В. Пегель

научный сотрудник
отдела физической электроники
к.ф.-м.н.



Е. М. Тотъменинов