

«Плазменная релятивистская СВЧ-электроника»

И.Л. Богданкевич, И.Е. Иванов, О.Т. Лоза, П.С. Стрелков, Д.К. Ульянов,

Отдел физики плазмы ИОФ РАН

А.А. Рухадзе

Теоретический отдел ИОФ РАН

Экспериментальные работы по плазменной релятивистской СВЧ-электронике в лаборатории плазменной электроники отдела физики плазмы ИОФ РАН ведутся более 20 лет. Поток релятивистских электронов распространяется вдоль силовых линий магнитного поля и взаимодействует по черенковскому механизму с заранее созданной плазмой, увеличивая амплитуду плазменной волны. Эксперимент основан на теории, разработанной А.А.Рухадзе с сотрудниками, в которой, в частности, показано, что поскольку релятивистские электроны возбуждают волну с высокой фазовой скоростью, ввод электромагнитного излучения в плазму и вывод излучения из плазмы значительно упрощается. Именно это позволило создать эффективные широкополосные плазменные СВЧ-генераторы и усилители. Это не удавалось сделать нашим предшественникам, так как они исследовали взаимодействие нерелятивистских электронных пучков с плазмой. Эксперименты по плазменной релятивистской СВЧ-электронике стали возможны с появлением сильноточных релятивистских электронных пучков в 70-х годах 20 века. Появление этих пучков стимулировало также возникновение вакуумной релятивистской СВЧ-электроники. К настоящему времени во многих лабораториях мира созданы различные вакуумные релятивистские СВЧ-генераторы и усилители. Вакуумные релятивистские СВЧ-приборы превосходят по эффективности и по мощности плазменные СВЧ-приборы, созданные в лаборатории. Однако все вакуумные релятивистские СВЧ-генераторы не имеют электронной перестройки частоты, а СВЧ-усилители имеют полосу усиления не более 1%. Плазменные СВЧ-генераторы имеют электронную перестройку частоты до 7 раз, а СВЧ-усилители имеют полосу усиления до 40%. Важно также, что плазменные СВЧ генераторы и усилители могут перестраиваться по частоте быстро. Это позволяет управлять частотой излучения в каждом из периодически следующих импульсов. Экспериментально доказана возможность перестройки частоты через время 20 мс, которое определяется частотой следования импульсов современных релятивистских сильноточных ускорителей. Принцип работы плазменных СВЧ-приборов позволяет осуществлять перестройку частоты через 100 мкс. Этим объясняется практический интерес к нашим исследованиям.

Кроме того, нам удалось создать более простые условия эксперимента, чем в предшествующих экспериментальных исследованиях пучковой неустойчивости с нерелятивистскими пучками. Например, в наших экспериментах плотность плазмы не изменяется во времени. В большинстве

наших экспериментов внешнее магнитное поле однородно в пространстве и постоянно во времени, поперечная структура пучка и плазмы не изменяется вдоль длины плазмы. Это позволило провести как аналитические, так и численные расчёты взаимодействия пучка с плазмой и сравнить их с результатами эксперимента. Благодаря этому в значительной степени поняты фундаментальные процессы взаимодействия релятивистского электронного пучка с пространственно ограниченной плазмой.

Следует отметить, что теория плазменно-пучкового взаимодействия продолжает развиваться. Так в теоретической работе 2008 года [5] исследованы эффект Черенкова и аномальный эффект Доплера для одного, двух, трёх и т. д. электронов на длине волны излучения и аналитически прослеживается переход от спонтанного излучения к вынужденному. Критерий перехода от одного механизма взаимодействия пучка с плазмой к другому с ростом тока пучка имеет общезначимое значение. Теоретические работы [3,4] имеют непосредственное отношение к эксперименту.

Аннотация.

В представленном цикле работ в трёх работах [1,6,7] исследуется плазменный СВЧ-усилитель, одна работа [8] посвящена исследованию плазменного СВЧ-генератора, в теоретических работах [3,4,5] обсуждаются проблемы влияния нормального и аномального эффектов Доплера на генерацию и усиление волн и, наконец, в работе [2] исследуются свойства релятивистского электронного пучка.

Впервые усиление в плазменном релятивистском СВЧ-усилителе на одной частоте было получено в 1998 году в лаборатории плазменной электроники ИОФ РАН. Затем в 2000 году была продемонстрирована принципиальная возможность усиления одним прибором двух частот 9 и 13 ГГц. Однако мощность излучения не превышала 8 МВт, коэффициент усиления был менее 23 дБ, эффективность менее 1%. Усилитель работал в узком диапазоне значений плотности плазмы. При плотности плазмы ниже порогового значения усиление отсутствовало, а при превышении рабочего диапазона значений плотности плазмы возникал режим генерации.

В работе [1] на частоте 9 ГГц достигнута мощность 40 МВт, к.п.д 4%, коэффициент усиления 29 дБ. На частоте 13 ГГц получено соответственно – 60 МВт, 6% и 30 дБ. При этом в два раза увеличился рабочий диапазон значений плотности плазмы, и усилитель стал работать устойчиво от одного импульса к другому без сопутствующей генерации. Такая широкая полоса усиления (от 9 до 13 ГГц) недостижима в рамках вакуумной релятивистской СВЧ-электроники. При этом коэффициенты усиления и эффективности плазменного усилителя близки к значениям вакуумных релятивистских СВЧ-усилителей.

Этот прогресс в [1] был достигнут, главным образом, за счёт выбора оптимального значения ведущего магнитного поля и его распределения вдоль длины плазменного волновода. Теоретические работы [3,4] и экспериментальная работа [6] посвящены физическому исследованию причины подавления режима СВЧ-генерации при оптимальном значении магнитного поля. Важно, что величина коэффициента усиления при этом сохраняется. Режим генерации возникает из-за того, что усиливаемая пучком попутная плазменная волна частично отражается от конца плазменного волновода и распространяется навстречу электронному пучку, обеспечивая положительную обратную связь и возникновение режима генерации. Если выполняется резонансное условие $\omega_H / 2\gamma = \omega$, то электронный пучок поглощает встречную волну за счёт нормального эффекта Доплера и подавляет режим генерации. Здесь ω_H – циклотронная электронная частота, γ – релятивистский фактор, а ω – усиливаемая частота. Если магнитное поле неоднородно вдоль длины плазменного волновода, то резонансное условие выполняется для широкой полосы частот в разных точках по длине плазменного волновода, что обеспечивает подавление режима генерации в широком диапазоне частот.

В работе [6] ширина спектра излучения усилителя оценивалась при помощи полосовых фильтров, а на одной из частот было проведено измерение спектра при помощи гетеродина. Методика измерения спектра излучения при помощи гетеродина оказалось очень трудоёмкой из-за наличия сильных электромагнитных помех. Кроме того, удалось зарегистрировать спектр в узкой полосе частот, которая составляла 20% от основной частоты. Для того чтобы измерять спектр излучения в широкой полосе частот, иметь возможность следить за изменением спектра во времени и, самое главное, измерять корреляцию входного и выходного излучений, необходимо было перейти к методу прямой регистрации электрического поля излучения при помощи осциллографа. В [7] описан усилитель, рассчитанный на частоты 2 и 3,2 ГГц, а измерения параметров излучения, проводились при помощи осциллографа с полосой частот до 4 ГГц. Получено усиление около 30 дБ на обеих частотах при уровнях мощности 30 МВт на частоте 2 ГГц и 70 МВт на частоте 3,2 ГГц. Распределение электрического поля выходного излучения в пространстве соответствовало моде H_{11} . Ширина спектра излучения определяется длительностью СВЧ-импульса.

В работе [6] измерена корреляция входного и выходного сигналов. Оказалось, что разность фаз входного и выходного сигналов на частоте 3,2 ГГц постоянна с точностью $\pm 30^\circ$. Уже этот результат позволяет создавать усилитель, состоящий из нескольких модулей. На вход каждого модуля подаётся один и тот же сигнал, а выходное излучение каждого модуля когерентно друг другу.

Исследования на усилителе 2 - 3 ГГц продолжаются. Получено усиление 35 дБ, что позволяет в будущем использовать промышленную лампу бегущей волны на входе усилителя и создать СВЧ-источник с

импульсной мощностью более 50 МВт с плавной перестройкой частоты в широком диапазоне частот.

Эффективность приборов релятивистской СВЧ-электроники зависит от качества электронного пучка. Вредное влияние вторичных электронов, вылетающих из коллектора электронного пучка, на работу СВЧ-приборов хорошо известно из классической нерелятивистской СВЧ-электроники. Особенность релятивистской СВЧ-электроники состоит в том, что используются сильноточные пучки с током близким к значению предельного вакуумного тока. Кроме того, в релятивистских пучках доля отражённых электронов с энергией электронов близкой к энергии падающих электронов возрастает. В [2] показано, что наличие в пучке отражённых электронов приводит к существенному увеличению потенциала в пучке и, следовательно, к уменьшению кинетической энергии электронов пучка. Кроме того, наличие в системе двух встречных пучков приводит к неустойчивости и уширению спектра электронов по энергиям. Всё это, в свою очередь, снижает эффективность СВЧ-приборов. В работе [2] показано, что без использования магнитного зеркала применение коллектора из железа практически недопустимо. Влияние отражённых электронов на первичный пучок для коллектора из графита значительно меньше, но, тем не менее, оно остаётся. В [2] получено количественное согласие эксперимента с расчётом, что позволяет в дальнейшем оценивать ожидаемую роль вторичных электронов методом численного моделирования.

Как уже говорилось, изменение плотности плазмы позволяет создавать **плазменные СВЧ-генераторы** с перестройкой частоты до 7 раз. Важно также, что перестройку частоты можно производить быстро, за характерное время распада и рождения плазмы, которое примерно равно 100 нс. Это преимущество плазменных СВЧ-приборов ранее экспериментально не было продемонстрировано, так как все исследования по плазменной релятивистской электронике, проведённые до 2007 года, были выполнены на ускорителях в режиме одиночных импульсов. В 2007 году был запущен новый ускоритель «Синус» изготовленный в ИСЭ СОРАН. Этот ускоритель генерирует пачку импульсов длительностью 1 секунда, максимальное число импульсов тока пучка 100. Плазменный источник создаёт плазму с управляемой плотностью перед инжекцией релятивистского пучка в каждом импульсе. Плотность плазмы в каждом из 100 импульсов задаётся компьютерной программой. Эта программа задаёт в каждом импульсе, то значение плотности плазмы, которое обеспечивает генерацию в данном импульсе заранее выбранной экспериментатором частоты излучения. **На импульсно-периодическом ускорителе проведена первая работа [7], в которой продемонстрировано управление частотой излучения от импульса к импульсу.** Такое управление частотой излучения от импульса к импульсу невозможно осуществить в вакуумных релятивистских СВЧ-приборах.

Этот цикл работ позволил нам не только значительно продвинуться в понимании основных эффектов плазменной СВЧ-электроники, но и создать макеты СВЧ-приборов с уникальными параметрами, которые не возможно получить в рамках вакуумной релятивистской СВЧ-электроники.

Проведение этих работ поддерживалось Министерством науки – программа уникальные установки России «Плазменный генератор» №01-04 в 2002-2006 годах, Президиумом Академии наук в 2002-2008 годах, РФФИ в 2002-2008 годах и CRDF в 2004-2006 годах.

Цикл работ по теме

«Плазменная релятивистская СВЧ-электроника».

1. А.В.Пономарев, П.С.Стрелков, «50-мегаваттный широкополосный плазменный СВЧ-усилитель», *Физика плазмы*, 2004, т. 30, №1, с. 66-72.
2. И.Л.Богданкевич И.Л., Стрелков П.С., Тараканов В.П., Ульянов Д.К. «Влияние отражённых от коллектора электронов на параметры сильнооточного релятивистского электронного пучка» *Физика плазмы*, 2004, т. 30, № 5, с. 412 - 418.
3. М.В.Кузелев, А.А.Рухадзе. «Аномальный эффект Доплера и вынужденный эффект Черенкова в плазменном волноводе с тонким трубчатым пучком электронов» *Физика плазмы*, 2005, т. 31, № 8, с. 693 - 700.
4. И.Н.Карташов, М.В. Кузелев, А.А.Рухадзе «Конкуренция неустойчивостей в условиях черенковского и аномального доплеровского резонансов электронного пучка с ленгмюровской и циклотронной волнами магнитоактивной плазмы» *ЖТФ*, 2006, т.76, в.1, с. 36-41.
5. М.В.Кузелев, А.А.Рухадзе «Спонтанное и вынужденное излучение электрона, электронного сгустка и электронного пучка в плазме» *УФН*, 2008, № 10, с.3- 33.
6. П.С.Стрелков, А.В.Пономарёв, И.Л.Богданкевич «Нормальный эффект Доплера в экспериментах по взаимодействию релятивистских электронных пучков с плазмой. Плазменный релятивистский СВЧ-усилитель», *Физика плазмы*, 2007, т. 33, № 4, с. 366-375.
7. И.Л.Богданкевич, И.Е.Иванов, О.Т.Лоза, П.С.Стрелков, Д.К.Ульянов, Е. Garate. «Плазменный релятивистский СВЧ-усилитель с диапазоном частот от 2 до 3 ГГц». Письма в ЖТФ, 2007, том.33, вып. 11, с.65-70.
8. И.Л.Богданкевич, Д.М.Гришин*, А.В.Гунин*, С.Д.Коровин*, И.Е.Иванов, О.Т.Лоза, Г.А.Месяц**, Д.А.Павлов, В.В.Ростов, П.С.Стрелков, Д.К.Ульянов «Импульсно-периодический плазменный релятивистский СВЧ-генератор с управляемой в каждом импульсе частотой излучения». *Физика плазмы*, 2008, т.34, №10, с.926 – 930.