

К 100-ЛЕТИЮ
М.С. РАБИНОВИЧА

УДК 621.384.6.01

М.С. РАБИНОВИЧ И ПЛАЗМЕННАЯ РЕЛЯТИВИСТСКАЯ
СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА

© 2019 г. П. С. Стрелков*

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

**e-mail: strelkov@fpl.gpi.ru*

Поступила в редакцию 20.05.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 20.06.2019 г.

Рассказано о становлении и развитии нового направления СВЧ-электроники – релятивистская СВЧ-электроника в лаборатории ФИАН, которую до 1982 года возглавлял Матвей Самсонович Рабинович. После пионерской совместной работы ФИАН–ИПФАН в 1973 году исследования по релятивистской вакуумной СВЧ электронике стали широко проводиться в нашей стране и за рубежом. В нашей лаборатории М.С. Рабинович произвел реорганизацию и создал условия для развития этих работ в трех новых экспериментальных научных группах. В одной из этих групп начались исследования по плазменной релятивистской СВЧ-электронике. Эти исследования проводятся и в настоящее время. Первые шаги этих исследований и их основные результаты описаны в этой статье.

DOI: 10.1134/S0367292119110155

В лаборатории плазменных ускорителей ФИАН с 1965 г. по инициативе М.С. Рабиновича и А.А. Рухадзе были начаты исследования по взаимодействию нерелятивистских электронных пучков с плазмой. Энергия электронов не превышала 10 кэВ. Такие исследования ранее уже велись в ХФТИ под руководством Я.Б. Файнберга [1, 2]. Прежде чем начать работы в этом новом для нашей лаборатории направлении, Матвей Самсонович получил поддержку Я.Б. Файнберга и направил меня в Харьков для ознакомления с техникой эксперимента. Таким образом, мы начали наши исследования с того уровня, который был достигнут в ХФТИ. В пионерских работах Харьковской школы экспериментальные результаты сравнивались с теорией безграничной плазмы. В наших исследованиях использовалась теория А.А. Рухадзе пространственно ограниченной плазмы и электронного пучка [3]. Следует упомянуть более ранние работы М.В. Незлина [4], в которых для объяснения эксперимента использовалась модель ограниченной плазмы для взаимодействия электронного пучка с редкой плазмой, у которой плотность меньше или равна плотности электронного пучка. В наших работах было показано, что в условиях, когда плотность плазмы значительно больше плотности электронного пучка, плазменно-пучковая неустойчивость в пространственно ограниченной плазме развивается, только при значениях плотности плазмы, превышающих критическое значение. Экспериментальные зависимости критической плотности от энергии

электронов, диаметров трубы дрейфа и плазмы совпадали с расчетными значениями. Таким образом, был идентифицирован тип неустойчивости [5].

В 1966 г. появились сообщения о новых высокоэнергетических электронных ускорителях [6, 7]. В этих ускорителях при сравнительно небольших энергиях электронов (не более 10 МэВ) создавались электронные пучки с токами до 10 МА, т.е. импульсная мощность электронного пучка достигала 10^{14} Вт. Матвей Самсонович решил продолжить исследования по взаимодействию электронного пучка с плазмой с использованием высокоэнергетических ускорителей. В нашу лабораторию был приглашен сотрудник СФТИ (г. Сухуми) Г.П. Мхеидзе, который имел опыт создания наносекундной высоковольтной техники, и в 1971 г. в мастерских ФИАН был изготовлен высокоэнергетический ускоритель с энергией электронов 600 кэВ и током пучка до 20 кА. После запуска ускорителя Матвей Самсонович предложил разработать вакуумный релятивистский СВЧ-генератор. Но у нас не было опыта создания мощных СВЧ-приборов, и поэтому Матвей Самсонович обратился к директору ИПФАН А.В. Гапонову с предложением провести совместную работу. Рассчитанная и изготовленная в ИПФАН лампа обратной волны (карсиноотрон) была установлена на ускорителе в ФИАН. Коллектив физиков из обоих институтов в 1973 г. на электронном пучке 670 кэВ, 4 кА, 10 нс получил излучение с мощностью

350 МВт на длине волны 3.1 см [8]. В нерелятивистской электронике импульсная мощность в этом диапазоне длин волн не превышала 10 МВт. Был создан первый в мире вакуумный релятивистский СВЧ-прибор. Возникло новое направление — вакуумная релятивистская СВЧ-электроника, которое стало развиваться во многих странах.

По решению М.С. Рабиновича был образован сектор “Плазменная электроника”, который возглавил А.А. Рухадзе, с тремя экспериментальными группами: М.Д. Райзера, Г.П. Мхеидзе и П.С. Стрелкова. Для размещения двух новых установок и двух новых экспериментальных групп освободили две большие комнаты. Ускорители было решено купить. Такие ускорители могли изготовить в ИЯФ в Новосибирске и в ИСЭ в Томске. Цены в этих организациях резко отличались, и поэтому были заказаны 2 ускорителя в Томске для нашей группы и для группы Г.П. Мхеидзе. В ИСЭ были разработаны чертежи, технология, а также изготовлены принципиально важные малогабаритные узлы ускорителя нашей группы. Крупногабаритные детали были изготовлены в ФИАН. Эта совместная работа по созданию новых установок привела к длительному взаимодействию нашей лаборатории с коллективом ИСЭ, возглавляемым Г.А. Месяцем.

Группы М.Д. Райзера и Г.П. Мхеидзе продолжили исследования по вакуумной релятивистской СВЧ-электронике. В частности, впервые в эксперименте была обнаружена сильная зависимость мощности излучения карсинотрона от величины внешнего магнитного поля. В группе Г.П. Мхеидзе начались работы по инъекции сильнооточного релятивистского электронного пучка (РЭП) в газ, их обзор можно найти в [9]. В нашей группе было проведено несколько работ по вакуумной СВЧ-электронике. Совместно с сотрудниками ИПФАН создан первый в мире вакуумный релятивистский гиротрон [10]. Показано, что заполнение гиротрона [11] плазмой позволяет увеличить мощность излучения за счет использования тока, превышающего значение предельного вакуумного тока. Но основным направлением экспериментальных исследований нашей группы была программа “Плазменная релятивистская СВЧ-электроника”. Планировалось создать мощные СВЧ-приборы, которые излучают только в присутствии плазмы. Далее будет рассказано о роли М.С. Рабиновича в становлении этих исследований.

Матвей Самсонович считал, что каждое экспериментальное исследование должно сопровождаться теоретическими работами. В нашей лаборатории руководителями экспериментальных секторов были как экспериментаторы, так и теоретики, однако каждое направление эксперимен-

тальных исследований было связано с работами конкретного теоретика, сотрудника ФИАН. Взаимодействие экспериментаторов с теоретиками стимулировалось требованиями Матвея Самсоновича обязательного посещения еженедельного семинара лаборатории, на котором ставилось много докладов по теории плазмы.

Плазма за счет компенсации пространственного заряда пучка позволяет транспортировать вдоль внешнего магнитного поля электронные пучки с током, превышающим значение вакуумного предельного тока. Ожидалось, что в плазменной СВЧ-электронике удастся использовать пучки с большими значениями тока, чем в вакуумной [12]. В первых экспериментах, которые были начаты в 1973 г., было показано, что плазма действительно позволяет транспортировать пучки с током, превышающим предельный вакуумный ток в несколько раз.

После завершения программы экспериментальных исследований по транспортировке РЭП начались эксперименты по регистрации СВЧ-излучения. В первых теоретических работах [13] рассматривалась задача возбуждения электромагнитных волн сильнооточным релятивистским электронным пучком в полуограниченной металлической трубе, заполненной плазмой. Пучок и плазма находились в сильном продольном однородном магнитном поле. Было показано, что параметры РЭП позволяют возбуждать плазменно-пучковую неустойчивость с высоким инкрементом. Как и при нерелятивистских энергиях электронов, неустойчивость должна возникать при значениях плотности плазмы, превышающих критическое значение, причем частота возбуждаемого поля должна расти с ростом плотности плазмы.

Перед экспериментаторами встал вопрос, как реализовать в эксперименте условия, близкие к условиям теоретической задачи. Мы использовали опыт работ с нерелятивистскими электронными пучками. Плазма создавалась в газе дополнительным электронным пучком с энергией электронов 600 эВ до момента инъекции РЭП. При этом РЭП за счет малой длительности импульса не успевал ионизовать газ. У нас появилась возможность проводить измерения параметров СВЧ-излучения для широкого диапазона значений плотности плазмы. В наших экспериментах значение плотности плазмы стало независимым параметром. Пучок и плазма помещались в однородное продольное магнитное поле, но они, в отличие от теории, были ограничены в продольном направлении с обеих сторон. Для регистрации излучения в стенке волновода было сделано окно, прозрачное для СВЧ-излучения. Излучение попадало в приемный волновод, который распола-

гался вне вакуумной камеры, напротив окна. Это позволяло измерять частоту излучения.

В эксперименте вопреки ожиданиям регистрировалось излучение только на циклотронной частоте. Хорошо известная плазменно-пучковая неустойчивость не регистрировалась, т.е. частота излучения не зависела от плотности плазмы. Через некоторое время была найдена причина этого эффекта. Эксперимент надо поставить так, чтобы плазма не попадала в диод, где формируется РЭП. Плазма в диоде приводит к его пробое. В первых экспериментах область диода релятивистского пучка и плазменный волновод разделялись титановой фольгой толщиной 50 мкм. Эта фольга имела прозрачность более 90% для релятивистских электронов, а плазма не могла попасть в диод. Однако релятивистские электроны при прохождении через фольгу получали поперечную скорость, средний угол рассеяния составлял 48 градусов. Появлялся разброс продольной компоненты скорости электронов, что резко снижало инкремент пучковой неустойчивости. Замена титановой фольги на 10-микронную алюминиевую фольгу привела к ослаблению циклотронного излучения и появлению излучения с частотами, которые зависели от величины плотности плазмы. Стало ясно, что фольгу надо убирать, и была предложена схема эксперимента с трубчатой плазмой. В этой бесфольговой схеме РЭП пролетает внутри плазменной трубки, а плазма не попадает в диод из-за диафрагмы, диаметр которой был больше диаметра пучка, но меньше диаметра плазмы.

Затем возник вопрос, какова энергия СВЧ-поля в плазменном волноводе, другими словами, какая доля энергии РЭП преобразовалась в энергию СВЧ-поля. В первых экспериментах регистрировалось СВЧ-излучение поперек оси волновода. Окно в стенке волновода нарушало азимутальную симметрию плазменного волновода. Интерпретация результатов эксперимента становилась чрезвычайно сложной. Единственным способом решения задачи о преобразовании энергии пучка в энергию электромагнитного поля состоял в выводе СВЧ-поля из плазмы в свободное пространство вдоль оси волновода, не нарушая азимутальную геометрию эксперимента. Сначала был испытан такой же способ вывода СВЧ-излучения, какой был успешно применен в вакуумных релятивистских СВЧ-приборах. Электронный пучок распространяется в электродинамической системе в однородном магнитном поле и затем в ослабленном магнитном поле высаживается на стенку волновода. Электронный пучок прозрачен для СВЧ-излучения. СВЧ-излучение после области ослабленного магнитного поля попадает в рупор. На выходе рупора закреплено диэлектрическое окно. Измерения параметров СВЧ-пучка проводятся в свободном простран-

стве на некотором расстоянии от диэлектрического окна. В плазменном СВЧ-генераторе в области ослабленного поля на стенку высаживаются не только электроны пучка, но и трубчатая плазма. Оказалось, что трубчатая плазма не прозрачна для СВЧ-излучения, поэтому такая схема непригодна. Была предложена другая схема. СВЧ-излучение из плазменного волновода попадало в коаксиальный вакуумный волновод с диаметром внутреннего проводника равным диаметру плазмы и затем в рупор. По всей длине и плазма, и электронный пучок находились в однородном магнитном поле. Таким способом мы добились простейшей схемы эксперимента по взаимодействию электронного пучка с плазмой, доступной для построения аналитической теории и численного моделирования. Пучок и плазма распространяются вдоль оси металлической трубы в однородном магнитном поле, пучок инжектируется в заранее заготовленную плазму. Именно для этой геометрии впоследствии был проведен подробный аналитический расчет плазменного СВЧ-генератора и СВЧ-усилителя [14]. Экспериментально было показано, что частота излучения однозначно связана с плотностью плазмы и возрастает при ее увеличении [15]. Одновременно после этой модификации эксперимента удалось на выходе из рупора получить мощное излучение. Первая статья о плазменном СВЧ-генераторе [15] была опубликована в 1982 году. Таким образом, задача, поставленная в 1971 г., получила решение через 10 лет. Соавтором статьи был М.С. Рабинович. Замечу, что к этому времени наша группа опубликовала 24 статьи, и Матвей Самсонович был соавтором только в трех из них.

Я уже описал огромный вклад Матвея Самсоновича в постановку исследований по релятивистской СВЧ-электронике и реализацию самых первых экспериментов. Какова же была роль Матвея Самсоновича в наших экспериментальных поисках после 1974 года? Надо сказать, что научное руководство нашей работой осуществлял А.А. Рухадзе. Но и его участие на этом этапе экспериментов было минимально. М.С. Рабинович и А.А. Рухадзе полагали, что уровень наших исследований достаточно высокий, и предоставили нам полную самостоятельность, оказывая различную практическую помощь. А.А. Рухадзе только один раз выразил недовольство затянувшимся процессом, хотя всем был известен его взрывной характер. Успешному завершению этого этапа экспериментов способствовала спокойная дружеская атмосфера в лаборатории, которая в значительной мере определялась личными качествами Матвея Самсоновича. Мы пользовались знаниями и опытом наших коллег-экспериментаторов. Хочется вспомнить С.Н. Попова, Л.Э. Цоппа, Д.К. Акулину, Г.П. Мхеидзе. Большую помощь оказали ныне здравствующие

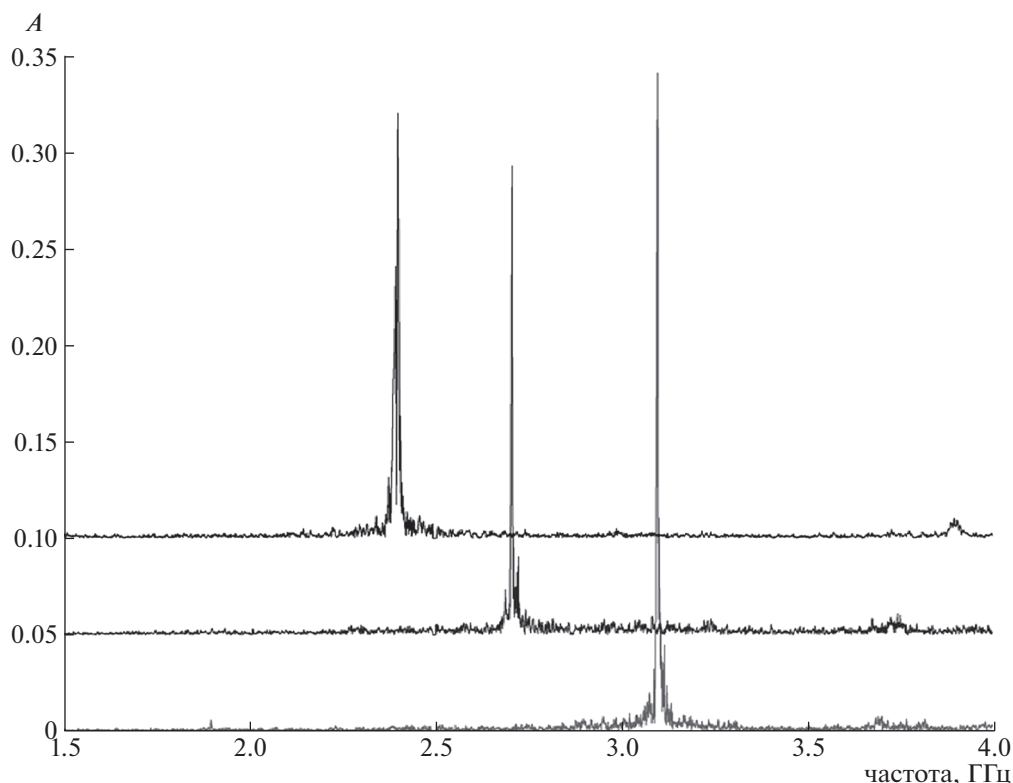


Рис. 1. Спектры плазменного релятивистского СВЧ-усилителя для частот входного сигнала 2.4, 2.7 и 3.1 ГГц. Мощность входного сигнала около 50 кВт, максимальная мощность излучения в импульсе 100–150 МВт. Спектры сигналов на частотах 2.7 и 2.4 ГГц смещены вверх на 0.05 отн. ед.

Г.М. Батанов, К.Ф. Сергейчев, Г.С. Лукьянчиков. Для объяснения трудных мест в книгах по теории плазмы я любил обращаться к И.С. Данилкину.

Исследования по плазменной релятивистской СВЧ-электронике в лаборатории, которая в 1982 г. стала называться Отделом физики плазмы ИОФАН, продолжались и после ухода – в том же году – М.С. Рабиновича из жизни. Ознакомьтесь с нашими последующими экспериментальными достижениями можно в [16]. Более полное описание работ с изложением теории взаимодействия электронного пучка с плазмой и результатов эксперимента содержится в [14].

Здесь я только кратко перечислю основные экспериментальные результаты, полученные к настоящему времени. В первую очередь надо сказать, что осуществлена простейшая схема плазменного СВЧ-излучателя. Ранее во многих экспериментах плазменно-пучковая неустойчивость изучалась при инжекции пучка в газ. Электронный пучок создавал плазму и возбуждал электромагнитное поле. Это поле также ионизовало газ. Со временем плотность достигала оптимального значения, при котором возникали поля с максимальной напряженностью, и дальнейшее увели-

чение плотности приводило к уменьшению напряженности электромагнитного поля, что в свою очередь приводило к уменьшению плотности плазмы. Два основных параметра эксперимента: напряженность электромагнитного поля и плотность плазмы, – зависели друг от друга. Построить теоретическую модель этого процесса очень сложно. В нашей постановке эксперимента плотность плазмы – независимый параметр. Заметим, что в нерелятивистской плазменной СВЧ-электронике было несколько экспериментов по инжекции пучка в заранее заготовленную плазму, но параметры этой плазмы не измерялись.

Инжекция пучка в заранее заготовленную плазму с известными параметрами, однородное магнитное поле, простая геометрия вакуумной камеры позволили построить теоретическую модель, близкую к эксперименту, и эффективно использовать метод численного моделирования для изучения процесса возбуждения электромагнитного поля при пучковой неустойчивости в пространственно ограниченной плазме. В последние годы практически все наши экспериментальные исследования сопровождаются численным моделированием с помощью кода “КАРАТ” [17].

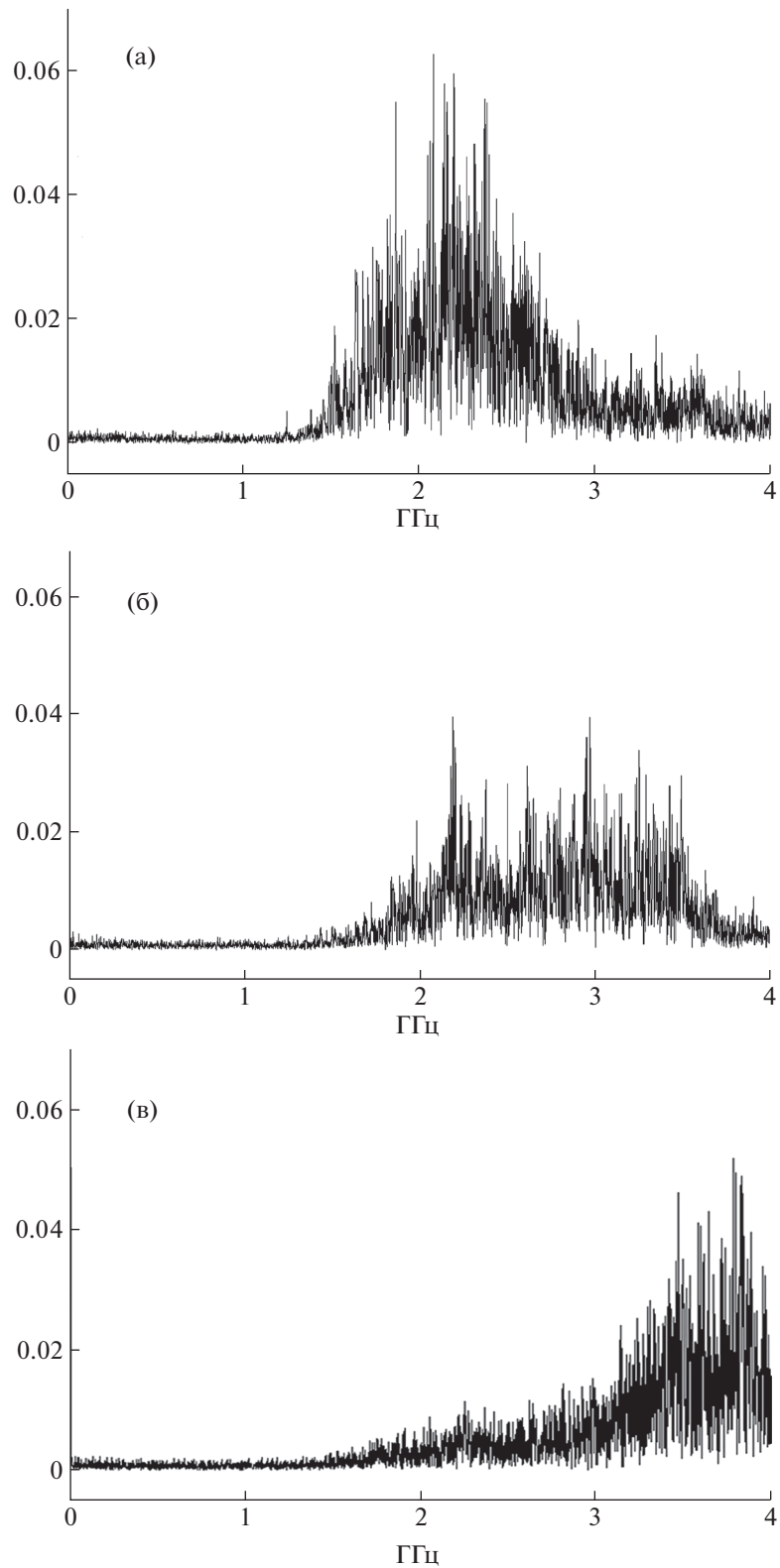


Рис. 2. Спектры излучения плазменного релятивистского СВЧ-усилителя шумов РЭП для разных значений плотности плазмы. Плотность плазмы увеличивается от верхнего графика к нижнему. Энергия СВЧ-импульсов 5–10 Дж.

Перейдем теперь к прикладному значению наших работ. Прежде всего, надо сказать, что предсказанная в [12] возможность использования в плазменных черенковских СВЧ-приборах электронных пучков с токами, превышающими ток в вакуумных приборах, не подтвердилась. При дальнейшем развитии теории было установлено, что ограничения на оптимальное значение тока примерно одинаковы в черенковских СВЧ-приборах – и в вакуумных, и в плазменных. В плазменном СВЧ-приборе можно транспортировать ток значительно больший, чем в вакуумном, но мощность излучения при этих больших токах не возрастает. Это утверждение проверено экспериментально.

Экспериментально показано, что частоту плазменного релятивистского СВЧ-генератора можно перестраивать, изменяя плотность плазмы, например, от 4 до 28 ГГц [18]. При этом энергия СВЧ-импульсов сохраняется. Такую перестройку частоты невозможно осуществить в вакуумных СВЧ-приборах. Ширина спектра импульса излучения у плазменного СВЧ-генератора с перестройкой частоты велика, например, в приведенном примере всегда больше 4 ГГц. При уменьшении длины плазмы в плазменном СВЧ-генераторе или вблизи критического значения плотности плазмы излучение становится монохроматическим, но широкая перестройка частоты монохроматического излучения невозможна.

Перестройку средней частоты плазменного СВЧ-генератора можно производить быстро электронным образом, заготавливая перед каждым последующим импульсом тока РЭП плазму с новым значением плотности. В работе [19] была продемонстрирована перестройка частоты плазменного СВЧ-генератора на 80% в каждом импульсе тока релятивистского электронного пучка из последовательности импульсов, следующих с интервалом времени 50 мс.

Создан плазменный релятивистский СВЧ-усилитель входного монохроматического сигнала с частотной полосой усиления 14%. Для изменения частоты монохроматического излучения на выходе усилителя необходимо изменять только частоту входного сигнала, а плотность плазмы при этом постоянна. Одновременное изменение частоты входного сигнала и плотности плазмы позволяет перестраивать частоту выходного излучения на 25%. На рис. 1 представлены спектры выходного излучения плазменного усилителя для разных значений частот входного сигнала от внешнего источника: 2.4 ГГц, 2.7 ГГц и 3.1 ГГц. Оба метода управления частотой выходного излучения можно назвать электронными, и, как было показано на примере СВЧ-генератора, можно использовать для управления частотой излучения в последовательности импульсов тока, следующих

с интервалом времени 50 мс, что невозможно сделать в рамках вакуумной релятивистской СВЧ-электроники. Заметим также, в вакуумной релятивистской СВЧ-электронике не были созданы усилители сигналов внешних СВЧ-источников с различными частотами. Были разработаны только СВЧ-генераторы, частота которых изменялась механически.

К достоинствам плазменного релятивистского СВЧ-усилителя относится и большая длительность импульса выходного излучения: 400 нс при уровне мощности 100–150 МВт в дециметровом диапазоне длин волн. Лучшие вакуумные СВЧ-генераторы на фиксированной частоте в этом же диапазоне длин волн при уровне мощности 100 МВт имеют длительность СВЧ-импульса не более 150 нс [20].

В 2019 г. вышла наша работа [21] о создании плазменного релятивистского источника сверхширокополосного (СШП) электромагнитного излучения, основанного на усилении собственных шумов РЭП при инжекции его в плазму. Известны мощные источники сверхширокополосного излучения, принцип действия которых основан на преобразовании мощного высоковольтного электрического видеоимпульса с длительностью около 1 нс в электромагнитное излучение. Средняя частота такого излучателя определяется длительностью видеоимпульса. Поэтому для повышения средней частоты приходится уменьшать длительность СВЧ-импульса, что приводит к уменьшению его энергии. В таких устройствах энергия СВЧ-импульса не превышает 1 Дж. В плазменном СШП-источнике средняя частота определяется плотностью плазмы и не связана с длительностью СВЧ-импульса. Принципиальные физические отличия плазменного сверхширокополосного СВЧ-источника от излучателей видеоимпульса состоят в получении большей энергии в одном импульсе (до 10 Дж), в возможности управления средней частотой СВЧ-сигнала от одного импульса к другому, а также в том, что с увеличением средней частоты излучения энергия СВЧ-импульса не уменьшается. На рис. 2 приведены спектры плазменного СВЧ-усилителя шумов РЭП для различных значений плотности плазмы.

Все это было сделано благодаря тому, что в 70-е годы начались исследования по взаимодействию сильноточных РЭП с плазмой в лаборатории, которой руководил Матвей Самсонович Рабинович – ученый с широкой эрудицией и с выдающимся талантом научного организатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахизер А.И., Файнберг Я.Б. // ДАН СССР. 1949. Т. 65. С. 555.

2. Харченко И.Ф., Файнберг Я.Б., Николаев Р.М., Корнилов Е.А., Луценко Н.С. // ЖЭТФ. 1960. Т. 38. С. 685.
3. Райзер М.Д., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. // ЖТФ. 1968. Т. 38. С. 776.
4. Незлин М.В., Тактакишвили М.И., Трубников А.С. // ЖЭТФ. 1968. Т. 55. С. 397.
5. Богданкевич Л.С., Райзер М.Д., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. // ЖЭТФ. 1970. Т. 58. С. 1219.
6. Graybill S.F., Nablo S.V. // Appl. Phys. Lett. 1966. V. 8. P. 18.
7. Бугаев С.П., Загулов Ф.Я., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А. Тез. докл. Всесоюзной конф. по созданию и методам испытания высоковольтной электрофизической аппаратуры. Томск: ТГУ, 1967. С. 48.
8. Ковалёв Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д., Сморгонский А.В., Цопп Л.Э. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. С. 232.
9. Месяц Г.А., Мхеидзе Г.П., Савин А.А. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. Вводный том IV. М.: Наука, 2000. С. 108.
10. Гинзбург Н.С., Кременцов В.И., Петелин М.И., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. // ЖТФ. 1979. Т. 42. С. 378.
11. Кременцов В.И., Петелин М.И., Рабинович М.С., Рухадзе А.А., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. // ЖЭТФ. 1978. Т. 75. С. 2151.
12. Рабинович М.С., Рухадзе А.А. // Физика плазмы. 1976. Т. 2. С. 715.
13. Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. // ЖЭТФ. 1971. Т. 62. С. 233.
14. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. 2-е изд. доп. М.: Ленанд, 2018.
15. Кузелев М.В., Мухаметзянов Ф.Х., Рабинович М.С., Рухадзе А.А., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. С.1358.
16. Стрелков П.С. // УФН. 2019. Вып. 5. С. 517.
17. Тараканов В.П. Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003.
18. Стрелков П.С., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. С. 329.
19. Андреев С.Е., Ульянов Д.К. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 26.
20. Barker R.G., Schamiloglu E. High-power microwave sources and technologies. IEEE. New York, 2001.
21. Стрелков П.С., Тараканов В.П., Диас Михайлова Д.Е., Иванов И.Е., Шумейко Д.В. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 335.