

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Институт прикладной физики

# ФИЗИКА МИКРОВОЛН

*Сборник отчетов  
по научным проектам МНТП России  
"Физика микроволн"*

В двух томах

Том 1

Нижний Новгород  
1999

11842-99

1999  
11006  
N1

Издано по решению научного совета МНТП «Физика микроволн»  
при Министерстве науки и технологий Российской Федерации  
и редакционно-издательского совета Института прикладной физики РАН

УДК 537.86.029; 621.3.029

**Физика микроволн:** Сборник отчетов по научным проектам МНТП России  
"Физика микроволн". В двух томах / Отв. ред. Е. В. Суворов. – Нижний Новго-  
род, 1999. – Том 1. – 192 с.

В сборник включены отчеты по 53 проектам, выполнявшимся по Межот-  
раслевой научно-технической программе "Физика микроволн" с 1995-го по  
1998 г. Отчеты отражают результаты исследований по четырем основным на-  
правлениям физики микроволн: 1) Источники микроволнового излучения;  
2) Распространение микроволновых излучений и мониторинг окружающей  
среды; 3) Микроволновая спектроскопия и метрология. Приемники микровол-  
новых излучений; 4) Взаимодействие микроволнового излучения с веществом.

Исследуемые эффекты и физические закономерности, разработанные ме-  
тоды и устройства находят применение в радиоспектроскопии, связи, локации,  
радиовидении, дистанционном зондировании окружающей среды, новых тех-  
нологиях, плазмохимии и других областях науки и техники.

Сборник представляет интерес для широкого круга радиофизиков и ра-  
диоинженеров.

2/12/99  
[Signature]

11842-99

Сверено  
2018

МНТП СО РАН  
Публ. Науч.-тех.  
Библиотека

СВЕРЕНО  
2012

Ответственный редактор

Е. В. СУВОРОВ

Редколлегия

В. Л. БРАТМАН, С. В. ГОЛУБЕВ, Н. Н. КРАЛИНА (отв. секретарь),  
О. С. МОЧЕНЕВА, Л. И. ФЕДОСЕЕВ (зам. отв. редактора)

ISBN 5-201-09312-4

© Институт прикладной физики РАН, 1999 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Межотраслевая научно-техническая программа  
"Физика микроволн" была сформирована в 1995 году со  
сроком выполнения до конца 2000 года. Планировалось  
разбить программу на два этапа: 1995–1997 годы и 1998–  
2000 годы. Поэтому сроки выполнения проектов, включен-  
ных в первый этап, и планы работ по ним были рассчитаны  
на три года, после чего планировалось проведение полно-  
весного второго этапа. В связи с задержкой начала выпол-  
нения работ по Программе на полгода и еще примерно  
полугодовым пропуском в финансировании срок выпол-  
нения работ по первому этапу был продлен до конца 1998  
года.

В настоящем сборнике представлены итоговые отчеты  
о результатах работы по проектам Межотраслевой научно-  
технической программы "Физика микроволн" за весь от-  
четный период 1995–1998 годов. По существу – это завер-  
шение того срока, на который было проведено первоначальное планирование работ по проектам.

Как следует из представленных отчетов, намеченная  
программа исследований по МНТП "Физика микроволн"

- gyrotrons // Int. Workshop "Strong Microwaves in Plasmas", Nizhny Novgorod, Russia, August 7-14, 1996. V. 2. Proc. / Ed. A.G. Litvak. P. 745-761.
12. *Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Koiganov N.G., Manuilov V.N., Ofitserov M.M., Samsonov S.V., Volkov A.B.* High-Harmonic Relativistic Gyrotron as an Alternative to FEL // 11th Int. Conf. on High Power Particle Beams, 1996, Prague, Czech Republic. Conf. Proc. / Ed. K. Jungwirth, J. Ullschmied. P. 400-403.
  13. *Bratman V.L., Phelps A.D.R., Savilov A.V.* Recovery of Electron Energy in Cyclotron Autoresonance Masers // *Physics of Plasmas*. 1997. V. 4, № 6. P. 2285-2291.
  14. *Savilov A.V.* Negative-Mass Instability in Magnetron-Injection Guns // *Physics of Plasmas*. 1997. V. 4, № 6. P. 2276-2284.
  15. *Savilov A.V., Bratman V.L., Phelps A.D.R., Samsonov S.V.* New Opportunity of Efficiency Enhancement for FEL-oscillators // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*. 1998. V. 407. P. 480-484.
  16. *Denisov G.G., Bratman V.L., Phelps A.D.R., and Samsonov S.V.* Gyro-TWT with a Helical Operating Waveguide: New Possibilities to Enhance Efficiency and Frequency Bandwidth // *IEEE Trans. on Plasma Science*. 1998. V. 26, № 3. P. 508-518.
  17. *Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Manuilov V.N., Samsonov S.V.* Gyrotron at the 5th Cyclotron Harmonic // the 23rd Int. Conf. on IR and MM Waves, Colchester, UK, Sept.7-11, 1998, Conf. Digest, T. J. Parker, S.R.P. Smith Eds. P. 325-326.
  18. *Калынов Ю.К., Братман В.Л., Волков А.Б., Колганов Н.Г., Самсонов С.В.* МЦАР и релятивистские гиротроны как эффективные источники миллиметровых и субмиллиметровых волн // XXV Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2-6 марта, 1998, Тезисы докладов, с. 168.
  19. *Bratman V.L., Grom Yu.D., Kalynov Yu.K., Manuilov V.N., Ofitserov M.M., and Samsonov S.V.* Electron beam formation for relativistic CRMs // 12th Int. Conf. on High Power Particle Beams, Haifa, Israel, June 7-12, 1998, Conf. Proc. (to be published).
  20. *Savilov A.V.* Regime of trapping and adiabatic deceleration of electrons in a sectioned electron RF generator // *IEEE Trans. on Plasma Science*. 1998. V. 26, № 1. P. 36-40.
  21. *Bratman V.L., Fedotov A.E., Savilov A.V.* RF space-charge effects in CRM with arbitrary phase velocity of the operating wave // *Int. J. of IR and MM Waves*. 1998. V. 19, № 7. P. 939-956.
  22. *Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Samsonov S.V., Savilov A.V., Phelps A.D.R., Cross A.W.* Cyclotron autoresonance maser in the regime of trapping and adiabatic deceleration of electrons // 12th Int. Conf. on High Power Particle Beams, Haifa, Israel, June 7-12, 1998, Conf. Proc. (to be published).
  23. *Bratman V.L., Fedotov A.E., Kalynov Yu.K., Manuilov V.N., Ofitserov M.M., Samsonov S.V., Savilov A.V.* Moderately Relativistic High-Harmonic Gyrotrons for Millimeter / Submillimeter Wavelength Band // *IEEE Trans. on Plasma Science*, 1999 (to be published).

### Проект 1.3. Теоретическое и экспериментальное исследование мощных мазеров на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью

ИПФ РАН, ИЯФ СО РАН

*А.В. Аржанников, Н.С. Гинзбург, Н.Ю. Песков, С.Л. Синуцкий, А.С. Сергеев*

**Цели и основные направления исследований.** В рамках проекта развивается концепция генераторов когерентного излучения миллиметрового диапазона длин волн гигаваттного уровня мощности. Увеличение мощности достигается путем развития вдоль одной из поперечных координат области взаимодействия при сохранении умеренных плотностей токов релятивистских электронных пучков ленточной и трубчатой геометрии. Для обеспечения пространственной синхронизации излучения предложено использовать так называемую двумерную распределенную обратную связь (РОС) [1, 2], которая может быть реализована с помощью двумерных брэгговских резонаторов планарной и коаксиальной геометрии [3, 4]. Новый механизм обратной связи позволяет получить пространственно-когерентное излучение при поперечных размерах системы, на порядки превосходящих длину волн.

**Электродинамические свойства двумерных брэгговских резонаторов.** Двумерная РОС может быть реализована в брэгговских резонаторах планарной и коаксиальной геометрии. Эти резонаторы представляют собой отрезки волноводов, на боковые стенки которых нанесена двоякопериодическая гофрировка. При этом трансляционные вектора элементарных решеток направлены либо перпендикулярно друг другу, либо под некоторым углом. Подобные брэгговские структуры обеспечивают связь и взаимное рассеяние электромагнитных волн, распространяющихся попутно и навстречу электронному потоку, а также в поперечных (азимутальных) по отношению к поступательному движению частиц направлениях. Наличие поперечных потоков электромагнитной энергии приводит к синхронизации излучения различных частей электронного потока.

В рамках проекта исследованы электродинамические свойства двумерных брэгговских резонаторов планарной и коаксиальной геометрии, включая двухзеркальные схемы. Найдены структуры, добротности и спектр собственных мод этих резонаторов, показана их

высокая селективность как по продольному (как в "одномерных" аналогах), так и по поперечному индексу мод [5, 6].

Для измерения электродинамических характеристик пространственно-развитых планарных и коаксиальных резонаторов в ИПФ РАН разработан экспериментальный стенд, позволяющий формировать широкий (40 ÷ 50 см) волновой пучок с плоским фазовым фронтом. Результаты проведенных "холодных" экспериментов [7] подтверждают результаты теоретического анализа. Измеренные полосы прозрачности, коэффициенты отражения, прохождения и рассеяния в поперечном направлении, а также частоты и добротности собственных мод резонатора находятся в хорошем соответствии с расчетом.

Характеристики двумерных брэгговских резонаторов могут быть улучшены путем подбора угла между трансляционными векторами периодических решеток. В этом случае парциальные волны, распространяющиеся вдоль поступательного движения частиц и в поперечном направлении, могут относиться к разному типу и иметь различные поляризации. В частности, волны, распространяющиеся в поперечном направлении, могут иметь малую групповую скорость (для этих волн частота излучения близка к частоте отсечки), что обеспечивает дополнительные возможности для селекции мод при увеличении расстояния между поверхностями, на которые нанесен гофр [3, 6].

**Теоретическое исследование процесса установления автоколебаний в МСЭ с одномерной и двумерной РОС.** Одной из основных задач проекта, является сравнение по степени пространственной когерентности излучения в МСЭ с "традиционной" одномерной РОС и предлагаемой двумерной РОС. Численное моделирование процесса установления колебаний в рамках пространственно-временного подхода [8, 9] показало, что реализация одномодового одночастотного режима генерации возможна как в одномерных, так и в двумерных брэгговских резонаторах. Однако в МСЭ с одномерной РОС в спектре излучения преимущественно представлена одна мода, если ширина системы не превышает 5 ÷ 10 длин волн. Установление одномодового режима генерации в этой области параметров обусловлено нелинейной конкуренцией мод. При ширине резонатора до 50 длин волн возможно установление стационарного режима генерации на супермодах, т. е. модах, составленных из нескольких мод холодного волновода [10]. При этом фазы мод взаимно коррелированы и излучение является пространственно-когерентным. Однако при изменении расстройки синхронизма электронов с волной (т. е. при изменении средней энергии или поступательной скорости частиц) поперечный профиль излучения в стационарном режиме меняется (т. е. меняется соотношение амплитуд гармоник, составляющих супермо-

ду). Таким образом, при нестабильной работе ускорителя модовый состав излучения может изменяться в течение импульса.

Достоинством "двумерных" брэгговских резонаторов является тот факт, что добротность одной из собственных мод, частота которой соответствует частоте точного брэгговского резонанса, существенно превосходит добротности остальных мод [5, 6], и, таким образом, реализуется эффективная электродинамическая селекция мод. В результате, в МСЭ с "двумерными" брэгговскими резонаторами паразитные моды быстро высвечиваются из резонатора и генерация на рабочей моде устанавливается уже на линейном этапе. Время переходного режима при этом существенно сокращается. Проведенное моделирование [5-9] показывает, что в МСЭ с двумерной РОС устойчивый режим одномодовой одночастотной пространственно-когерентной генерации может быть реализован в широкой области параметров при поперечных размерах системы, достигающих до  $10^2$ - $10^3$  длин волн. Важно подчеркнуть, что для наиболее высокодобротной моды поперечное распределение синхронной с электронным пучком парциальной волны не зависит от поперечной координаты (в случае коаксиальной геометрии это азимутально симметричная волна), что обеспечивает идентичность энергообмена для всех фракций пучка и, таким образом, увеличивает эффективность энергоотдачи РЭП.

**Моделирующие исследования МСЭ с ведущим магнитным полем.** Для выяснения оптимальных условий взаимодействия, обеспечивающих высокую эффективность энергообмена и малую критичность к разбросу параметров РЭП, в ходе выполнения проекта выполнен ряд моделирующих экспериментов с МСЭ с ведущим магнитным полем. В этих экспериментах поперечный размер области взаимодействия составлял несколько длин волн. В совместных экспериментах с ОИЯИ (Дубна) на базе линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000, формирующего нитевидный РЭП с энергией частиц 1 МэВ, током 200 А и длительностью импульса 200 нс, реализован МСЭ-генератор, работающий в режиме с обратным ведущим полем. При использовании в качестве селективного элемента двухзеркального брэгговского резонатора, реализующего одномерную РОС, на длине волны 8 мм получена выходная мощность излучения 35 МВт с электронным КПД 25% [11, 12]. Усовершенствование брэгговского резонатора путем внесения скачка фазы гофрировки внутри пространства взаимодействия позволило повысить мощность излучения до 50 МВт, а КПД до 35% [13]. Указанный уровень эффективности является рекордным для миллиметровых МСЭ.

Эксперименты с МСЭ планарной геометрии проведены на сильно-точном наносекундном ускорителе Синус-6 (500 кэВ, 100 А, 25 нс) (ИПФ РАН, Н. Новгород). Продемонстрирована возможность

эффективной работы МСЭ в режиме двойного резонанса, когда одновременно выполнены условия ондуляторного и циклотронного синхронизмов. Получено излучение на длине волны 6 мм с выходной мощностью 7 МВт при КПД 12% [14].

**МСЭ с трубчатым РЭП и коаксиальным двумерным брэгговским резонатором.** Важным результатом работы явилось также обоснование возможности использования двумерной РОС сверхразмерных волноводов в коаксиальной и цилиндрической геометрии [4, 15]. Теоретически показано, что при гофрировке внутренней стенки волновода в виде лево- и правозаходных спиралей выделенной добротностью обладает мода, образованная двумя бегущими по азимуту волнами “шепчущей галереи” и двумя распространяющимися вдоль оси волновода азимутально-симметричными волнами. На основе проведенного анализа рассмотрена возможность реализации МСЭ миллиметрового диапазона с двумерной РОС, запитываемых трубчатыми и цилиндрическими РЭП [15]. Сделан расчет и ведется изготовление основных узлов МСЭ для моделирующих экспериментов на основе ускорителя Стратклайдского университета (г. Глазго, Великобритания).

**Экспериментальное исследование МСЭ с ленточными РЭП.** Экспериментальные исследования в рамках проекта ведутся на базе сильноточных микросекундных ускорителей У-2 и У-3 (ИЯФ СО РАН) [16-19]. На основе ускорителя У-3, формирующего ленточный РЭП с энергией частиц до 1 МэВ, погонным током 200 А/см и поперечным сечением 0.3 см × 20 см, для экспериментов по генерации мощного миллиметрового излучения создан специализированный стенд “ЭЛМИ” (рис. 1) [19]. Транспортировка и фокусировка пучка в вакуумном канале осуществляется однородным продольным магнитным полем с напряженностью 0.5 ÷ 1.5 Т. Для измерения параметров СВЧ-излучения используются калиброванные полупроводниковые детекторы, калориметр, а также набор критических волноводных фильтров. На ускорителе изготовлен вакуумный объем, позволяющий проводить измерение свойств излучения без его вывода в атмосферу, что позволяет устранить влияние пробоев на вакуумном окне. Для повышения средней мощности излучения исследована возможность перевода ускорителя и МСЭ-генератора в режим работы с частотой до 5 Гц.

Следует отметить, что в первых экспериментах для раскачки поперечной скорости частиц использовался пассивный планарный ондулятор, состоящий из постоянных магнитов. Период ондулятора составлял 4 см, ондулятор имел участок плавного нарастания поля на первых 5 периодах. В регулярной части амплитуда поперечной компоненты магнитного поля на оси не превышала 0.08 Т, в результате чего требуемая

поперечная скорость частиц  $\beta_{\perp} \approx 0.2$  могла быть достигнута только в режиме двойного циклотронного резонанса, т. е. при напряжениях

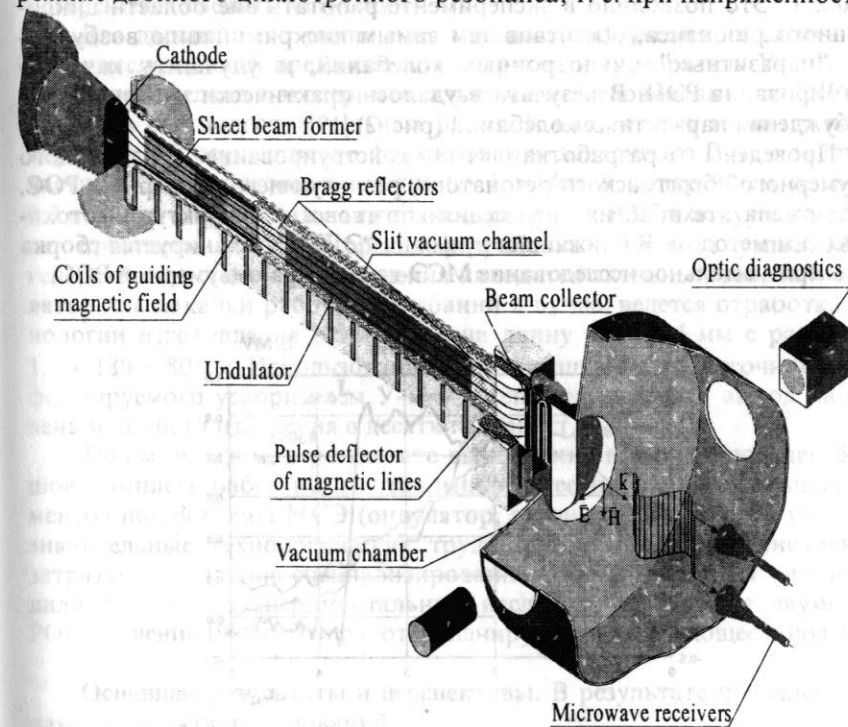


Рис. 1. МСЭ с ленточным РЭП. Схема экспериментов на специализированном стенде “ЭЛМИ” (ИЯФ РАН, Новосибирск)

ведущего поля 0.9 ÷ 1.0 Т близких к резонансному значению. В этом режиме был реализован 4-миллиметровый МСЭ с мощностью 200 МВт (электронный КПД около 5%), длительностью СВЧ-импульса до 1 мкс и рекордным для генераторов миллиметрового диапазона энергозапасом в СВЧ-импульсе до 200 Дж [17, 18]. На этом этапе селективное возбуждение рабочей моды обеспечивалось двухзеркальным брэгговским резонатором в виде параллельных пучку пластин, реализующим “традиционную” одномерную РОС. В этих экспериментах в спектре выходного излучения заметно присутствовала “паразитная” 8-миллиметровая компонента (около 25% полной мощности), обусловленная возбуждением более высокой моды резонатора, частота которой была близка к частоте отсечки.

Основываясь на результатах теоретического анализа и предшествующих экспериментальных исследований МСЭ с ведущим полем

был изготовлен активный токовый ондулятор, позволяющий независимо изменять величину поперечного магнитного поля в пределах от 0 до 0.2 Т. Это позволило в эксперименте работать вне области циклотронного резонанса, обеспечив тем самым дискриминацию возбуждения "паразитных" циклотронных колебаний, и улучшить качество формирования РЭП. В результате удалось практически избавиться от возбуждения паразитных колебаний (рис. 2) [19].

Проведены разработка и конструирование планарного "двумерного" брэгговского резонатора, реализующего двумерную РОС. Предложена технология нанесения брэгговских структур фотохимическим методом. В ближайшее время на "ЭЛМИ" планируется сборка и экспериментальное исследование МСЭ-генератора с двумерной РОС.

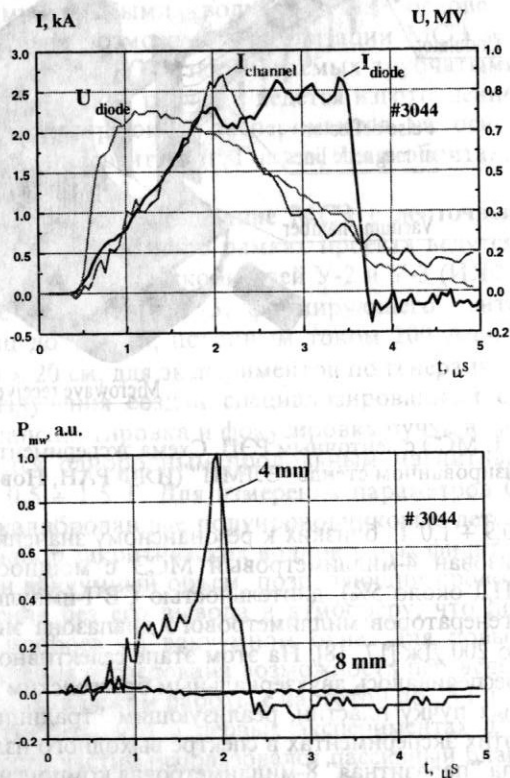


Рис. 2. Типичные осциллограммы импульсов тока пучка, напряжения и СВЧ-импульса

Созданный на предыдущем этапе исследований генератор с одномерной РОС должен будет использоваться для сравнения модового состава и когерентных свойств излучения.

Для дальнейшего увеличения мощности излучения на следующем этапе исследований предполагается переход на ускоритель У-2. В этой связи параллельно с экспериментальными исследованиями на "ЭЛМИ" проведен ряд подготовительных работ. К настоящему моменту на ускорителе У-2 осуществлено формирование ленточного РЭП с энергией частиц 1 МэВ, погонным током до 1 кА/см и поперечным сечением  $0.7 \times 140$  см [20]. Реализована транспортировка РЭП в вакуумном канале, проведена конструкторская разработка основных узлов МСЭ-генератора, в стадии изготовления находится активный токовый ондулятор для накачки рабочих колебаний в пучке, ведется отработка технологии изготовления резонатора на длину волны 4 мм с размерами  $1.5 \times 180 \times 80$  см. Использование полномасштабного ленточного РЭП, формируемого ускорителем У-2, позволит осуществить выход на уровень мощности излучения в десятки гигаватт.

Таким образом, в результате выполнения проекта проведен большой комплекс работ по изготовлению и тестированию основных элементов новой схемы МСЭ (ондулятор, резонатор и т.д.). Тем не менее, значительные технологические трудности, а также дополнительные затраты на создание специализированного стенда "ЭЛМИ" не позволили провести экспериментальные исследования МСЭ с двумерной РОС в течение 1998 г. Эти работы планируются на следующее полугодие.

**Основные результаты и перспективы.** В результате проведенных в рамках проекта исследований:

1. Развита оригинальная концепция мощных микроволновых генераторов с двумерной распределенной обратной связью. На основе существующих в настоящий момент в России (ИЯФ СО РАН, ИСЭ СО РАН) уникальных сильноточных ускорителей, формирующих ленточные и трубчатые РЭП с мощностью свыше 100 ГВт, использование двумерной РОС позволяет в перспективе реализовать источники когерентного миллиметрового излучения с уровнем мощности в десятки гигаватт.

2. В совместных экспериментах ИПФ РАН и ОИЯИ на базе ускорителя ЛИУ-3000 реализован МСЭ-генератор с брэгговским резонатором со скачком фазы гофрировки. Достигнут рекордный для МСЭ-генераторов уровень КПД 35%.

3. В совместных экспериментах ИПФ РАН и ИЯФ РАН на базе ускорителя У-2 при использовании в качестве электродинамической системы МСЭ одномерного брэгговского резонатора планарной геометрии достигнуты рекордные для релятивистских генераторов миллиметрового диапазона значения мощности излучения 200 МВт и

энергозапаса в СВЧ-импульсе 200 Дж, который на порядок превосходит известные результаты.

4. Проведены расчеты, конструкторская разработка, изготовление и тестирование основных узлов МСЭ с двумерной РОС на основе ускорителя У-3. Тем самым подготовлена база для проведения первых экспериментальных исследований МСЭ с двумерной РОС.

#### Публикации по теме проекта

1. Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. Использование двумерной распределенной обратной связи в лазерах на свободных электронах // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18, № 9. С. 23.
2. Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L. Super-power free-electron lasers with two-dimension distributed feedback // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research A. 1995. V. A358. P.189-192.
3. Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. Электродинамические свойства двумерных брэгговских резонаторов // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40, № 3. С. 401-404.
4. Гинзбург Н.С., Коноплев И.В., Сергеев А.С. Использование двумерной распределенной обратной связи для синхронизации излучения в ЛСЭ с трубчатым РЭП большого диаметра // ЖТФ. 1996. Т. 66, № 5. С. 108-117.
5. Peskov N.Yu., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Konoplev I.V., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L. Free electron lasers with sheet electron beams and two-dimensional planar Bragg resonators // Proc. of 12th Int. Conf. on High Power Particle Beams. Haifa, Israel, 1998. P. 306.
6. Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Konoplev I.V., Phelps A.D.R., Robb G.R.M., Cross A.W., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L. Theory and design of FELs with a two-dimensional feedback driven by a sheet electron beam // Physics of Plasmas (in press).
7. Песков Н.Ю., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Сергеев А.С., Аржанников А.В., Синецкий С.Л. Электродинамические свойства двумерных брэгговских резонаторов планарной геометрии // Письма в ЖТФ (в печати).
8. Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L. Dynamics of FEMs with 1-D and 2-D distributed feedback // Proc. of II Asian FEL Symp. Novosibirsk, Russia, 1995. P. 262-268.
9. Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Phelps A.D.R., Robb G.R.M., Sergeev A.S. Mode competition and control in free electron devices with one and two dimensional bragg resonators // IEEE Trans. on Plasma Science. 1996. V.24, № 3. P. 770-781.
10. Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Аржанников А.В., Синецкий С.Л. О возможности генерации на супермодах в ЛСЭ с поперечно развитым пространством взаимодействия // Письма в ЖТФ (в печати).
11. Богаченков В.А., Гинзбург Н.С., Каминский А.А., Каминский А.К., Песков Н.Ю., Саранцев В.П., Седых С.Н., Сергеев А.П., Сергеев А.С. Высокоэффективный узкополосный ЛСЭ-генератор с брэгговским резонатором и обратным ведущим полем (начальные эксперименты) // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21, № 22. С. 44-50.
12. Ginzburg N.S., Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Peskov N.Yu., Sedykh S.N., Sergeev A.P., Sergeev A.S. Theoretical and experimental comparison of FEL-oscillators with conventional and reversed guide field // IEEE Trans. on Plasma Science. 1998. V. 26, № 3. P. 536-541.
13. Песков Н.Ю., Гинзбург Н.С., Каминский А.А., Каминский А.К., Седых С.Н., Сергеев А.П., Сергеев А.С. Высокоэффективный узкополосный ЛСЭ-генератор на основе брэгговского резонатора со скачком фазы гофрировки // Письма в ЖТФ (в печати)
14. Peskov N.Yu., Bratman V.L., Ginzburg N.S., Denisov G.G., Kol'chugin B.D., Samsonov S.V., Volkov A.B. Experimental study of a high-current FEM with a broadband microwave system // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research A. 1996. V. A375. P. 377-380.
15. Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Konoplev I.V., Sergeev A.S., Robb G.R.M., Phelps A.D.R., Cross A.W. Design of a Ka-band Free Electron Maser Oscillator with a Two-dimensional Bragg Cavity // Proc. of 19th Int. FEL Conf. Beijing, China, 1997. P. II-122-II-124.
16. Arzhannikov A.V., Bobylev V.B., Sinitsky S.L., Tarasov A.V., Ginzburg N.S., Peskov N.Yu. Ribbon-FEL experiments at one-dimension distributed feedback // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research A. 1995. V. A358. P. 112-113.
17. Agafonov M.A., Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Peskov N. Yu., Sinitsky S.L., Tarasov A.V. Powerful FEM-generator driven by microsecond sheet beam // Proc. of 11th Int. Conf. on High Power Particle Beams, Prague, Czech Rep., 1996. V. 1. P. 213-216.
18. Agafonov M.A., Arzhannikov A.V., Ivanenko V.G., Ginzburg N.S., Kalinin P.V., Kuznetsov S.A., Peskov N.Yu., Sinitsky S.L. Generation of hundred Joules microwave pulse at 4mm wavelength by FEM with sheet beam // IEEE Trans. on Plasma Science. 1998. V. 26, № 3. P. 531-535.
19. Arzhannikov A.V., Bobylev V.B., Ivanenko V.G., Ginzburg N. S., Peskov N.Yu., Shcheglov M.A., Sinitsky S.L., Stepanov V.D. Progress in investigations on microwave FEL driven by microsecond sheet beam // Proc. of 12th Int. Conf. on High Power Particle Beams, Haifa, Israel, 1998. P. 262.
20. Arzhannikov A.V., Bobylev V.B., Nikolaev V.S., Sinitsky S.L., Tarasov A.V. New results of the full-scale ribbon beam experiments on U-2 device // Proc. of 11th Int. Conf. on High Power Particle Beams. San Diego, USA, 1994. P. 136-139.

Возможность более широкой перестройки частоты (до 5%) связана с зависимостью частоты ЛОВ от фокусирующего магнитного поля. Вследствие влияния циклотронного взаимодействия на стартовые условия ЛОВ вместе с изменением магнитного поля необходимо менять радиус электронного пучка. Для этого вместе с перестройкой частоты задающего генератора соответственно менялось магнитное поле в ЛОВ-секции при неизменном поле на катоде, что обеспечивало изменение радиуса электронного пучка. В 5% полосе частот выходная мощность менялась в пределах не более 20%.

**Заключение.** Применение принципа секционирования пространства взаимодействия в мощном СВЧ-усилителе позволяет достичь гигаваттных уровней излучения в сантиметровом диапазоне. Испытываемый СВЧ-усилитель показал коэффициент усиления 47 дБ с полосой частот 1% и с возможностью 5% перестройки частоты при помощи согласованного изменения магнитного поля и радиуса электронного пучка в ЛОВ-секции. Максимальный уровень выходной мощности (1.1 ГВт) был, вероятно, ограничен СВЧ-пробоем. Чтобы избежать пробоя, представляется целесообразным при дальнейшем усовершенствовании усилителя заменить существующую выходную секцию ЛБВ на каскад, работающий на (+1)-й пространственной гармонике, или увеличить поперечный размер секций, и соответственно использовать комбинацию более высоких мод.

#### Литература

1. *Abubakirov E.B., Fuchs M.I., Kovakev N.F.* Relativistic TWT with multi-channel non-linear feedback // Proc. of Int. Workshop on High Power Microwave Generation and Pulse Shortening. 1997. P. 3-10.
2. *Abubakirov E.B., Fuchs M.I., Kolganov N.G., Kovakev N.F., Palitsin A.V., Volkov A.B.* Reduction of focusing magnetic field in relativistic Cherenkov oscillators // Proc. of Int. Workshop «Strong Microwave in Plasmas». 1996. V. 2. P. 810-828.
3. *Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Fuchs M.I., Kolganov N.G., Kovakev N.F., Petelin M.I., Savelyev A.V., Solovyanov E.I., Yastrebov V.V.* X-band amplifier of Gigawatt pulse power // Int. Workshop RF 98, Pajaro, Dunes, California, USA, October, 1998.

#### Проект 1.5. Исследование и разработка магниконов сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн

ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН

*И.А. Запругаев, Е.В. Козырев, И.Г. Макаров,  
О.А. Нежевенко, А.А. Никифоров,  
Г.Н. Острейко, Б.З. Персов, Г.В. Сердобинцев,  
В.В. Тарнецкий, С.В. Щелкунов, В.П. Яковлев*

Одной из ключевых проблем при проектировании современных ускорителей для научных и прикладных целей является создание мощных эффективных импульсных и непрерывных микроволновых источников энергии. Поэтому специальной целью нашей деятельности является развитие и дальнейшее исследование нового направления мощных микроволновых источников с модуляцией релятивистского пучка электронов путем круговой развертки.

Это направление развивается с 1967 года, когда академик Г.И. Будкер предложил новый ВЧ-прибор [1], в котором непрерывный релятивистский электронный пучок модулируется путем изменения своего пространственного положения при круговой развертке. Этот микроволновый источник получил название гирокона. В ИЯФ СО РАН было создано несколько гироконов различной конструкции на различные частоты и параметры [1, 2, 3, 4].

Дальнейшее развитие электронных приборов с круговой разверткой стало возможно с изобретением и созданием "гирокона с магнитным сопровождением", получившего название магниконо [5].

Испытания первого магниконо – прототипа непрерывного (квазинепрерывного) микроволнового усилителя – были проведены в нашем институте в середине 80-х годов [5]. На частоте 915 МГц была достигнута мощность 2.6 МВт и электронный КПД 85% при работе на согласованную нагрузку. Затем были проведены испытания работы магниконо на ускоряющую структуру разрезного микротрона [6]. В этих экспериментах была проверена способность магниконо работать на изменяющуюся резонансную нагрузку без циркулятора. Это свойство чрезвычайно важно при создании современных ускорительных комплексов в связи с высокой стоимостью вентильных устройств большой мощности.

Параллельно с экспериментальной работой шло совершенствование программного обеспечения для расчета электронной оптики, элек-



ромагнитных полей резонаторов и динамики электронного пучка в магнисконе как в установившемся, так и в переходном режиме [7, 8, 9, 10]. Таким образом, к середине 90-х годов в нашем институте был накоплен значительный экспериментальный и теоретический опыт по созданию нового поколения СВЧ-приборов с модуляцией электронного пучка путем круговой развертки. В рамках данного проекта круг наших исследований в 1995–1998 годах был сосредоточен на:

1) разработке концепции и теоретическом исследовании длинноимпульсного магнискона мощностью 10 МВт на частоте 1300 МГц с КПД более 70 % для фундаментальных исследований, промышленного и экологического применения;

2) создании импульсного 7 ГГц магнискона с проектной мощностью 50–60 МВт и КПД более 50 % как прототипа источника СВЧ для линейных электрон-позитронных коллайдеров.

### 1. Проект длинноимпульсного 1300 МГц магнискона

Опыт создания первого магнискона позволил нам разработать мощный длинноимпульсный прибор для научных и прикладных целей. В 1995 году нами была завершена разработка проекта 1300 МГц магнискона (рис. 1). Параметры прибора (табл. 1) позволяют и сегодня рассматривать его перспективным СВЧ-источником ускорительных комплексов для физики высоких энергий и прикладных целей (протонные линейные ускорители большой мощности для утилизации радиоактивных отходов) [11].

Таблица 1

Рабочая частота	1300 МГц
Выходная мощность	10 МВт
Длительность импульса	2 мс
Частота повторения	10 Гц
Средняя выходная мощность	200 кВт
Входная мощность	70 Вт
Напряжение пучка	250 кВ
Ток пучка	51 А
Импульсная мощность пучка	12.8 МВт
КПД	0.76
Усиление	52 дБ
Максимальная энергия электронов в коллекторе	120 кэВ
Минимальная энергия электронов в коллекторе	20 кэВ
Полоса на уровне -1 дБ	1 МГц
Микропервеанс	0.4

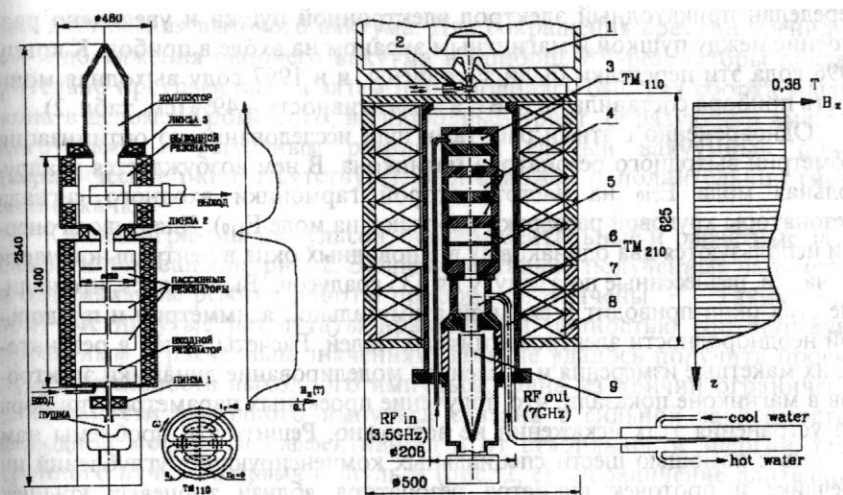


Рис. 1. Магнискон 1300 МГц и 7 ГГц

### 2. Импульсный 7 ГГц магнискон мощностью более 50 МВт

В начале 90-х годов в ИЯФ начались работы по созданию продвинутой версии магнискона - прототипа микроволнового источника для линейных суперколлайдеров с проектной мощностью 50-60 МВт и эффективностью более 50% [12]. Прибор отличается от первого магнискона единым магнитным сопровождением в системе развертки (модуляции) и выходном резонаторе. Работа происходит на второй гармонике входной частоты. К 1995 году был создан уникальный источник электронов с импульсной мощностью в пучке 100 МВт и электростатической компрессией по площади поперечного сечения пучка более 2000 [13], испытаны несколько вариантов конструкции магнискона [14]. На частоте 7 ГГц была достигнута выходная мощность 20 МВт, а электронный КПД составил 25% (основные экспериментальные параметры приведены в табл. 2). Были выяснены основные причины ограничения эффективности и мощности прибора. В результате конструкция системы модуляции электронного пучка в магнисконе претерпела изменения (см. рис. 1). Однако для устойчивой работы системы развертки потребовалось изменить и величину магнитного поля сопровождения с 0.45 до 0.38 Т. Для сохранения диаметра электронного пучка (менее 2.8 мм) и его согласования с магнитным полем сопровождения в магнисконе (малые пульсации по радиусу) был

переделан прикатодный электрод электронной пушки и увеличено расстояние между пушкой и магнитным экраном на входе в прибор. К концу 1996 года эти переделки были закончены, и в 1997 году выходная мощность прибора составила 46 МВт, а эффективность – 49% (см. табл. 2).

Одновременно с этими работами шли исследования по оптимизации геометрии выходного резонатора магнিকона. В нем возбуждается квадрупольная мода  $E_{210}$  на частоте второй гармоники входного сигнала (резонаторы круговой развертки работают на моде  $E_{110}$ ). Для вывода энергии используются два одинаковых волноводных окна в центральной части обечайки, разнесенные по азимуту на 135 градусов. Выяснилось, что наличие этих окон приводит к сильной азимутальной асимметрии и продольной неоднородности электромагнитных полей. Расчеты полей в резонаторе, их макетные измерения и численное моделирование динамики электронов в магнিকоне показали, что получение проектных параметров прибора без устранения этих искажений не возможно. Решить эти проблемы нам удалось с помощью шести специальных компенсирующих углублений на обечайке и проточек диаметра резонатора вблизи торцевых крышек [15,16]. Компенсирующие углубления повторяют геометрию выходных волноводных окон и сдвинуты по отношению к ним по азимуту на угол кратный 45 градусам. Размеры проточек у торцевых стенок резонатора выбираются по специально разработанной и испытанной методике. Новый выходной резонатор был изготовлен в 1997 году, а в 1998 году начались полномасштабные испытания магнিকона с этим резонатором.

К настоящему времени достигнута выходная мощность 55 МВт и эффективность 56% (табл. 2) [17].

Таблица 2

Параметры	1995	1996	1997	1998
Входная частота, ГГц	3.499	3.503	3.501	3.5025
Выходная частота, ГГц	6.998	7.006	7.002	7.005
Выходная мощность, МВт	20	30	46	55
Электронный КПД, %	25	35	49	56
Усиление, дБ	47	53	62	72
Длительность импульса, мкс	1.3	1.1	1.0	1.1
Частота повторения, Гц	2	2	2	2
Напряжение пучка, кВ	400	420	405	427
Ток пучка, А	200	240	230	230

ВЧ-система магнিকона сделана разборной. Отдельные резонаторы соединены друг с другом посредством индиевых уплотнений, что позволяет производить оперативную замену отдельных частей, но препятствует возможности прогрева резонаторов до высоких температур

для достижения высокого вакуума. Для сокращения времени тренировок и достижения рабочего вакуума в приборе ВЧ-резонаторы предварительно прогревались, а затем производилась быстрая сборка магнিকона в целом. Кроме того, волноводный тракт, образующий вместе с нагрузками и выходным резонатором единый вакуумный объем (керамическое окно отсутствует), был снабжен дополнительной системой откачки.

Оциллограммы импульсов, экспериментальные и расчетные зависимости показаны на рис. 2. Экспериментально полученные параметры в оптимальном режиме работы прибора обозначены ".". Таким образом, достигнутые результаты практически полностью соответствуют проектным и расчетным значениям. Нам не удалось получить проектную длительность выходного импульса. Одна из причин ограничения длительности выходного импульса связана с сильной зависимостью выходной мощности (эффективности) от стабильности энергии электронного пучка во время импульса (рис. 2, е). Ограничение длительности возможно также из-за возбуждения в последнем пассивном резонаторе 0-моды колебаний. Этот резонатор представляет собой два связанных через центральное отверстие резонатора (коэффициент связи – 0.7%), рабочей модой которого является р-мода. Расчеты, однако, показывают, что в определенных режимах возбуждение 0-моды может ограничивать длительность выходного сигнала на уровне от 0.8 до 1.3.

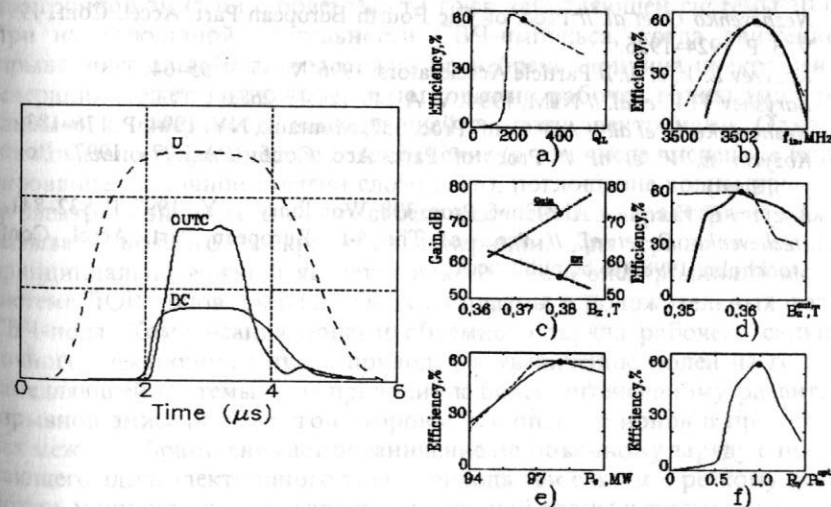


Рис. 2. U – напряжение на пушке; DC – входной сигнал; OUTC – выходной сигнал; а) нагрузочная характеристика; б) частотная характеристика; в) усиление и КПД от магнитного поля; д) КПД от магнитного поля в выходном резонаторе; е) КПД от мощности пучка; ф) управляющая характеристика

Для устранения этих эффектов мы планируем в 1999 году модернизировать систему питания электронной пушки с целью увеличения длительности импульса тока со стабильной энергией. В настоящее время мы разрабатываем также новый последний пассивный резонатор с целью устранения вышеупомянутого недостатка.

### Литература

1. Budker G. I. et al. // Particle Accelerators. V. 10. 1979. P. 41–59.
2. Карлинер М. М. и др. Препринт ИЯФ 84-110. Новосибирск, 1984.
3. Будкер Г. И. и др. // Труды 5-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. 1977. Т. 1. С. 284-287.
4. Балакин В. Е. и др. // Труды 10-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц 1987. Т. 1. С. 277-280.
5. Karliner M. M. et al. // NIM-A, 1988. V. A 269, № 3. P. 459–473.
6. Акимов В. Е. и др. Препринт ИЯФ СО АН СССР 89-162. Новосибирск, 1989.
7. Fomel B., Tiunov M. and Yakovlev V. // Proc. XIII Int. Conf. on High-Energy Acc., 1987. V. 1. P. 353–355.
8. Myakishev D. and Yakovlev V. // Proc. of Part. Acc. Conf., Dallas, 1995. V. 5. P. 2348.
9. Yakovlev V. et al. // Proc. of Part. Acc. Conf., Dallas, 1995. V. 3. P. 1569.
10. Tiunov M. A. "BEAM – 2D Code Packadg from Simulation of High Perveance Beam Dynamics in Long Systems", INP Preprint (to be published).
11. Nezhevenko O. et al. // Proc. of The Fourth European Part. Accel. Conf. 1994. V. 3. P. 1924–1926.
12. Kozyrev E. V. et al. // Particle Accelerators, 1996. V. 55. P. 55–64.
13. Baryshev Y. V. et al. // NIM, 1994. V. A 340. P. 241–258.
14. Nezhevenko O. et al. // AIP Conf. Proc. 337, Montauk, NY. 1994. P. 176–183.
15. Kozyrev E. V. et al. // Proc. of Part. Acc. Conf. (PAC'97). 1997. (to be published).
16. Kozyrev E. V. et al. // AIP Conf. Proc. 398, Woodbury, N.Y., 1997. P. 832–841.
17. Nezhevenko O. et al. // Proc. of The 6-th European Part. Accel. Conf., Stockholm, 1998, (to be published).

## Проект 1.6. Разработка, создание и исследование мощных эффективных источников СВЧ-излучения на базе сильноточных импульсно-периодических ускорителей

ИСЭ СО РАН

С.Д. Коровин, А.В. Гунин, В.П. Губанов,  
А.И. Климов, И.К. Куркан, И.В. Пегель,  
С.Д. Полевин, В.В. Ростов, Е.М. Тотьменинов

В рамках данного проекта нами проводились теоретические и экспериментальные работы в двух направлениях.

1. Для выяснения причин ограничения длительности микроволнового импульса релятивистской ЛОВ [1-4] был проведен ряд экспериментальных и теоретических исследований [5]. В результате экспериментов, проведенных с ЛОВ на основе сильноточного электронного ускорителя «Синус-6» при уровне СВЧ-мощности ~500 МВт, было установлено, что укорочение СВЧ-импульса сопровождается развитием взрывной электронной эмиссии с поверхности гофр замедляющей системы ЛОВ. При наносекундной длительности СВЧ-импульса, когда движением взрывоэмиссионной плазмы можно пренебречь, причина прекращения генерации может заключаться в поглощении рабочей волны эмитированными с поверхности замедляющей системы электронами. Однако, как показало теоретическое рассмотрение (в том числе численное моделирование различной степени сложности), поглощение волны при чисто электронной эмиссии в силу своего нелинейного характера не может вызывать полного прекращения генерации. Для срыва генерации принципиально важным является накопление в электродинамической системе ЛОВ ионов, вытягиваемых из плазмы в положительных фазах СВЧ-поля. Компенсация ионами объемного заряда рабочего сильноточного электронного пучка приводит к увеличению полей на гофрах замедляющей системы, что приводит к более интенсивному развитию взрывной эмиссии. С другой стороны, накопление ионов в промежутках между гофрами снимает ограничение по объемному заряду с протекающего здесь электронного тока, приводя тем самым к резкому росту потерь мощности рабочей электромагнитной волны и срыву генерации. Данный механизм ограничения длительности СВЧ-импульса в релятивистской ЛОВ был подтвержден результатами нестационарного чис-