

11. *Bratman V.L., Dumbrajs O., Nikkola P., Savilov A.V.* Space-charge effects as a source of electron energy spread and efficiency degradation in gyrotrons // IEEE Trans. on Plasma Science, in press.
12. *Savilov A.V., Bratman V.L., Phelps A.D.R., Samsonov S.V.* Theoretical explanation and experimental observation of effective cyclotron coupling of traveling and near-cutoff modes on a phase-synchronized electron beam // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, in press.
13. *Bratman V.L., Cross A.W., Denisov G.G., He W., Phelps A.D.R., Ronald K., Samsonov S.V., Whyte C.G. and Young A.R.* Experimental Operation of a Wide-Band Gyro-travelling Wave Amplifier with a Helical Interaction Waveguide // Phys. Rev. Lett., in press.

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

ИЯФ СО РАН, ИПФ РАН

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

В рамках проекта исследуется возможность повышения мощности мазеров на свободных электронах (МСЭ) за счет увеличения одного из поперечных размеров области взаимодействия при сохранении локальных параметров электронного пучка на достигнутом в настоящее время уровне. Основой проекта являются сильноточные релятивистские электронные пучки ленточной геометрии, формируемые в ИЯФ СО РАН на ускорителях У-2 и У-3, в которых при энергии частиц ~ 1 МэВ достигнут энергозапас 0,5 МДж и длительность импульса около 10 мкс [1]. В данном проекте на основе таких пучков предполагается реализовать МСЭ гигаваттного уровня мощности. При этом проблема получения когерентного излучения при большой ширине пучка должна решаться путем использования двумерной распределенной обратной связи (РОС) [2].

В 1999 году в ИЯФ СО РАН для проведения микроволновых экспериментов было завершено создание специализированного стенда «ЭЛМИ» на основе ускорителя У-3. Это позволило провести первые эксперименты по генерации миллиметрового излучения в МСЭ с двумерной РОС, продемонстрировавшие работоспособность нового механизма обратной связи.

В данной серии экспериментов использовался ленточный электронный пучок с поперечным сечением $0,4 \times 12$ см. Этот пучок формировался в ускорительном диоде с магнитной изоляцией катод-анодного промежутка и транспортировался в щелевом вакуумном канале продольным магнитным полем, которое могло варьироваться в пределах от 3 до 15 кГс. Энергия частиц составляла 0,8 МэВ, погонный ток около 200 А/см, длительность импульса достигала 5 мкс. Раскачка рабочих баунс-осцилляций пучка производилась в планарном ондуляторе с периодом 4 см, выполненном в виде прямоугольных катушек с током. Плавное уменьшение амплитуды ондуляторного поля достигалось на первых 6 периодах путем уменьшения величины тока в обмотках. Поперечное поле ондулятора на оси в регулярной части достигало 1,5 кЭ.

Для устранения влияния пробоя выходного окна МСЭ высокочастотные измерения проводились без вывода излучения в атмосферу в специально изготовленном вакуумном объеме. Регистрация СВЧ-мощности осуществлялась набором калиброванных детекторов на горячих носителях. Для определения спектрального состава излучения использовались волноводные фильтры, имеющие полосы пропускания 74,7–75,8 ГГц, 76,5–78,5 ГГц, 71,2–77,1 ГГц.

В качестве электродинамической системы в МСЭ-генераторе использовался двумерный планарный двухзеркальный брэгговский резонатор, который обеспечивал двумерную распределенную обратную связь в рабочем диапазоне частот около 75 ГГц. Резонатор был выполнен в виде двух параллельных пучку медных пластин, на которые нанесена двоякопериодическая гофрировка из прямоугольных канавок. Углы между канавками составляли 45° к оси пучка, период решетчатой структуры был равен 2,82 мм, глубина канавок – 0,2 мм. Зазор между пластинами составлял 1 см. В экспериментах использовались брэгговские зеркала длиной 18 см со стороны катода, 10 см со стороны коллектора. Расстояние между входным и выходным зеркалами составляло 64 см.

Холодные электродинамические измерения показали, что в соответствии с расчетом в рабочем диапазоне частот наличие двух эффективных зон рассеяния рабочей ТЕМ-волны резонатора: рассеяния, осуществляемого через связь четырех парциальных волн того же (ТЕМ) типа в районе частоты 75 ГГц (двумерный цикл обратной связи) и непосредственного рассеяния во встречную волну ТМ₂-типа в районе частоты 78 ГГц (одномерный цикл обратной связи) [3–4].

В результате экспериментов на ускорителе «ЭЛМИ» получено излучение в рабочем диапазоне частот. Структура излучения соответствовала возбуждению рабочей ТЕМ-волны резонатора. Настройка режима МСЭ на максимум выходной мощности осуществлялась изменением полей ондулятора и соленоида. Оптимальные значения полей и ширина зоны самовозбуждения генератора находились в хорошем соответствии с моделированием (рис. 1). Следует отметить, что уменьшение мощности излучения наблюдалось при ведущих магнитных полях ≤ 1 Т, что объясняется ухудшением качества формирования винтового пучка в ондуляторе при приближении ведущего магнитного поля к циклотронному резонансу.

Максимальная мощность получена при ведущем магнитном поле 1,2 Т и ондуляторном поле около 0,1 Т (рис. 1). В этом режиме мощность излучения, принимаемая входным рупором детектора, составила 30 кВт, что в соответствии с калибровкой детектора соответствовало выходной мощности на уровне 100 МВт [5–6]. На рис. 2 представлена типичная осцилло-

грамма СВЧ-импульсов, которые представляли собой последовательность всплесков излучения длительностью до 1 мкс. Таким образом, в экспериментах достигнут энергозапас в одиночном СВЧ-импульсе около 1 Дж, рекордный для миллиметрового диапазона. КПД МСЭ при этом составил 5 %, что находится в хорошем соответствии с результатами моделирования для данной конфигурации резонатора. Расчеты показывают, что увеличение КПД до 15 % может быть достигнуто путем оптимизации резонатора и уменьшением длины пространства взаимодействия до 30 см.

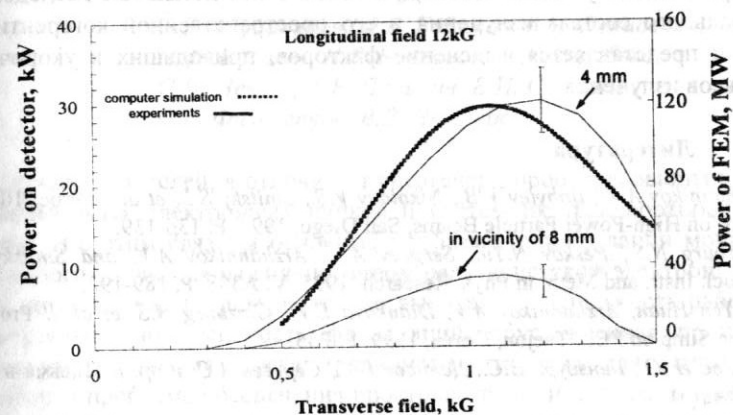


Рис. 1. Зависимость мощности излучения от величины ондуляторного поля

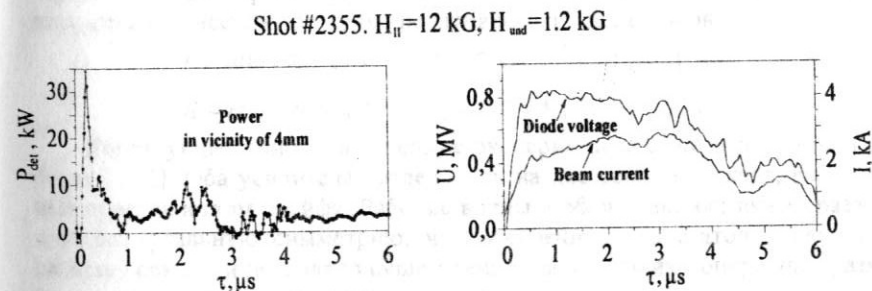


Рис. 2. Типичные осциллограммы 75 ГГц СВЧ-импульса, напряжения на диоде и тока пучка

Измерения спектра показали, что основная часть мощности излучения (более 80 %) сосредоточена в районе частоты 75 ГГц, соответствующей реализации двумерного механизма обратной связи. В ряде импульсов наблюдалось излучение на частоте около 78 ГГц, что соответствовало возбуждению генератора на традиционном одномерном механизме обратной связи, имевшем место в этом частотном диапазоне. Однако мощность «паразитной» компоненты не превышала 20 %.

На следующем этапе работ планируются оптимизации параметров генератора с целью увеличения КПД, а также более детальные исследования спектрального состава излучения и его пространственной когерентности. Важным представляется выяснение факторов, приводящих к укорочению импульсов излучения.

Литература

1. Arzhannikov A.V., Bobylev V.B., Nikolaev V.S., Sinitsky S.L. et al. // Proc. 10th Int. Conf. on High-Power Particle Beams, San Diego, 1994. P. 136-139.
2. Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Arzhannikov A.V. and Sinitsky S.L. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research. 1995. V. A358. P. 189-192.
3. An Yen Huan, Arzhannikov A.V., Diankova E.V., Ginzburg N.S. et al. // Proc. 4th Asian Simp on FEL, Taejon, Korea, 1999. P. P35.
4. Песков Н.Ю., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Сергеев А.С. и др. // Письма в ЖТФ (в печати).
5. Agarin N.V., Arzhannikov A.V., Bobylev V.B., Ginzburg N.S. et al. // Proc. IV Int. Workshop "Strong Microwaves in Plasmas", N. Novgorod, 1999. P. S24.
6. Agarin N.V., Arzhannikov A.V., Bobylev V.B., Ginzburg N.S. et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research A (in press).

Проект 1.4. Создание усилителя импульсных СВЧ-сигналов с выходной мощностью гигаваттного уровня на основе индуцированного черенковского излучения сильноточного релятивистского электронного пучка

ИПФ РАН

Э.Б. Абубакиров, М.Б. Гойхман, А.Н. Денисенко,
Н.Ф. Ковалев, Н.Г. Колганов, Г.С. Кораблев,
С.И. Нечуев, А.В. Палицин, Е.И. Солюянов,
С.Е. Фильченков, В.В. Ястребов

В случае усилителей, в отличие от автогенераторов, требования к качеству используемых электронных пучков и систем их транспортировки много выше. И с этим связаны основные проблемы при создании мощного импульсного усилителя на сильноточном релятивистском электронном пучке, для которого характерны не только высокая нестабильность работы, но и значительная интенсивность флуктуаций, обусловленная процессами в прикатодной плазме. Даже традиционно трудная для мощных СВЧ-приборов проблема обеспечения пространственной (а в случае усилителя и временной) когерентности выходного излучения представляется менее трудной, чем ограничение величины усиления, связанное с аномально большими флуктуациями в пучке и с изменением его характеристик в течение импульса.

В рамках этого проекта на предыдущих этапах были разработаны два варианта секционированных усилителей черенковского типа, использующих взрывоэмиссионные пучки релятивистских электронов:

$$E \approx 400-500 \text{ кэВ}, \quad J_b \approx 2 \text{ кА}, \quad \tau_b \approx 20 \text{ нс},$$

$$E \approx 800-1000 \text{ кэВ}, \quad J_b \approx 5-7 \text{ кА}, \quad \tau_b \approx 200 \text{ нс}.$$

Конструкция приборов и первые эксперименты с ними описаны в работах [1, 2]. Оба усилителя разделялись на две секции-каскада, разделенные пространством дрейфа. Рабочие волны в обеих секциях имели различную азимутальную симметрию, что обеспечивало достаточно глубокую развязку секций и позволяло существенно увеличить их поперечные размеры, и соответственно, повысить электропрочность.

В качестве входного каскада использовалась ЛОВ, работающая в глубоком регенеративном режиме. Причем обе системы позволяли перевести ЛОВ-секцию в автоколебательный режим работы. Выходная ЛБВ-секция

Проект 1.5. Исследование и разработка магниконов сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн и их применение в ускорителях для фундаментальных исследований и промышленных приложений

ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

*И.А. Запругаев, Е.В. Козырев, О.А. Нежесенко,
А.А. Никифоров, Г.Н. Острейко, Б.З. Персов,
Г.В. Сердобинцев, В.В. Тарнецкий, М.А. Туинов,
В.П. Яковлев*

С 1967 года в ИЯФ СО РАН ведутся работы по созданию мощных эффективных микроволновых источников энергии для нужд ускорительной физики и техники. В частности, успешно развивается и исследуется новое направление мощных микроволновых источников с модуляцией релятивистского пучка электронов путем круговой развертки. Первый прибор, использующий этот метод модуляции, получил название гирокон [1].

Дальнейший прогресс в развитии электронных приборов с круговой разверткой определен изобретением и созданием "гирокона с магнитным сопровождением", получившего название магникон [2]. В качестве прототипов источников ВЧ-мощности ускорителей были созданы и успешно прошли испытания магникон – прототип непрерывного микроволнового усилителя на частоту 915 МГц, и импульсный 7 ГГц магникон, работающий в режиме удвоения частоты входного сигнала [3].

В рамках данного проекта круг наших исследований в 1999 году был сосредоточен на:

- 1) разработке концепции и теоретическом исследовании импульсного магникона мощностью около 80 МВт на частоту 2856 МГц с КПД около 60 % в качестве альтернативного источника ВЧ-мощности линейного ускорителя – инжектора накопителя ВЭПП-5;
- 2) дальнейшем совершенствовании 7 ГГц магникона – прототипа источника СВЧ для линейных электрон-позитронных коллайдеров;
- 3) развитию и отработке технологии изготовления и настройки цельнопаянной, прогрессивной конструкции ВЧ-системы магниконов.

1. Проект импульсного 2856 МГц магникона

Опыт создания магниконов на 915 МГц (прототип непрерывного) и 7 ГГц (импульсного источника ВЧ для линейных коллайдеров) был использован

при разработке мощного импульсного прибора – прототипа для питания линейного ускорителя – инжектора накопителя ВЭПП-5 [4] на частоту 2856 МГц. Прибор работает на второй гармонике входной частоты и состоит из входного резонатора, четырех пассивных и выходного резонатора. Во входном и пассивных резонаторах возбуждаются колебания TEM_{110} на частоте 1428 МГц, а в выходном пучок возбуждает колебания TEM_{210} на частоте 2856 МГц. Расчетные параметры прибора, приведенные в таблице, позволяют рассматривать его альтернативным по отношению к клистрону SLAC [5] ВЧ-источником ускорительного комплекса ВЭПП-5.

Рабочая частота	2856 МГц
Выходная мощность	85 МВт
Частота входного сигнала	1428 МГц
Длительность импульса	4.2 мкс
Частота повторения	50 Гц
Входная мощность	840 Вт
Напряжение пучка	460 кВ
Ток пучка	310 А
Импульсная мощность пучка	140 МВт
Средняя выходная мощность	18 кВт
Усиление	50 дБ
КПД	0.6
Микропервеанс электронной пушки	1.0
Магнитная индукция на оси соленоида	0.18 Т
Максимальная напряженность ВЧ электрического поля в резонаторах	150 кВ/см
Максимальная средняя мощность в стенках резонаторов	300 Вт

Программное обеспечение, созданное в Институте, позволяет вести расчеты и проектирование электронных пушек и электронно-оптических каналов, производить численное моделирование электромагнитных полей резонаторов и динамики электронного пучка в магниконе как в установившемся, так и в переходном режиме [3]. С использованием этих программ была спроектирована электронная пушка на базе сферического оксидного катода диаметром 120 мм, созданного в Институте.

2. Импульсный 7 ГГц магникон мощностью более 50 МВт

С начала 90-х годов в ИЯФ СО РАН ведутся работы по созданию продвинутой версии магникона – прототипа микроволнового источника для линейных суперколлайдеров с проектной мощностью 50–60 МВт и эффективностью более 50 %. К настоящему времени выходная мощность прибора составляет 55 МВт, электронный КПД – 56 %, усиление 72 дБ при длительности выходного импульса ВЧ 1,1 мкс [6], что, за исключением длительности, практически полностью соответствует проектным параметрам. Основной причиной ограничения длительности выходного ВЧ-импульса является возбуждение 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 π -мода. Исследования показали, что при работе пучок возбуждает обе моды. В результате возникает неустойчивость, приводящая к срыву колебаний. Проведенное численное моделирование показало возможность замены этого двухззорного резонатора на два не связанных между собой резонатора без ухудшения характеристик прибора. В настоящее время эти резонаторы находятся в стадии проектирования.

3. Развитие и отработка технологии изготовления и настройки цельнопаянной, прогривной конструкции ВЧ-системы магниконов

Основной трудностью запуска любого микроволнового СВЧ-устройства является его тренировка и обезгаживание рабочих объемов. Наиболее просто это достигается в прогривных цельнопаянных структурах. В 1998–1999 годах в рамках научного сотрудничества ИЯФ СО РАН с фирмой OMEGA-P, Inc. (США) нами была изготовлена, настроена и испытана ВЧ-система для 11,424 ГГц магникона, создаваемого для питания линейных суперколлайдеров [7]. ВЧ-система для этого магникона представляет собой медную цельнопаянную резонаторную сборку, состоящую из семи резонаторов. Первые шесть резонаторов настроены на различные частоты вблизи 5,7 ГГц (система развертки), а седьмой на частоту близкую к 11,4 ГГц (вторая гармоника входной частоты). Все резонаторы сборки должны быть настроены при заданной температуре в вакуумных условиях с точностью не хуже 10^{-4} . Сборка должна выдерживать многократные прогревы до 400°C без изменения своих параметров.

Для выполнения этой задачи нами разработана и опробована специальная методика для настройки резонаторов на заданную частоту с точно-

стью 10^{-5} , а также разработана методика и создан специальный автоматизированный стенд для измерения собственных частот резонаторов с точностью 10^{-6} . В состав измерительного стенда входит управляемый от компьютера низкочастотный синтезатор (со стабильностью 10^{-7}) и набор созданных в Институте умножителей частоты. Выходная мощность умножителей на частоте вблизи 5,7 ГГц составляет 100 мВт, а на частотах вблизи 11,4 ГГц – 20 мВт.

Нами успешно опробована методика измерения, не требующая создания дорогостоящих помещений для стабилизации температуры, давления и влажности или использования эталонных резонаторов (как это обычно делается при создании ускоряющих структур):

1. Влияния температуры автоматически учитывается при измерении частот. Температурная поправка определяется по коэффициенту линейного расширения меди и измеренной температуре.

2. Стабилизация влажности и давления внутри резонаторов достигается путем наполнения их "сухим" азотом, получаемым путем испарения жидкого азота, под небольшим избыточным давлением.

К настоящему времени резонаторная сборка установлена на 11,4 ГГц магникон. Сам же магникон находится в стадии запуска.

Литература

1. Budker G.I. et al. Particle Accelerators. 1979. V. 10. P. 41-59.
2. Karliner M.M. et al. NIM-A. 1988. V. A 269, № 3. P. 459-473.
3. Kozyrev E. et al. AIP Conf. Proc. 472, Baltimore, 1998. P. 931-938.
4. Aleksandrov A.V. et al. Proc. of APAC'98 Conf., KEK, Tsukuba. 1998.
5. SLAC Klystron 2,856 GHz.
6. Kozyrev E. et al. AIP Conf. Proc. 474, Pajero Dunes, 1998. P. 187-194.
7. Gold S.H. et al. AIP Conf. Proc. 474, Pajero Dunes, 1998. P. 179-186.