

- millimeter and submillimeter wavelength radiation // Proc. of 10th Joint Workshop on ECE and ECRH (Ameland, the Netherlands, 1997).
11. *Bratman V. L., Kalynov Yu. K., Kolganov N. G., Manuilov V. N., Ofitserov M. M., Savilov A. V., Samsonov S. V. and Volkov A. B.* cyclotron autoresonance masers and relativistic gyrotrons // Proc. of 3rd Int. Workshop "Strong Microwaves in Plasmas", (N.Novgorod, 1997, ed. by A.G.Litvak). P. 45–761.
 12. *Bratman V. L., Denisov G. G., 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, in press.
 13. *Bratman V. L., Denisov G. G., Phelps A. D. R. and Samsonov S. V.* Gyro-TWT with a helical operating waveguide: new possibilities to enhance efficiency and frequency bandwidth // Digest of the 22nd Int. Conf. on IR and MM Waves (Wintergreen, USA, 1997, ed. by H. P. Freund). P. 289–290.
 14. *Братман В. Л., Федотов А.Э.* Спектр синхротронного излучения протяженного источника // ЖТФ. 1997. Т. 67, № 4. С. 137–139.
 15. *Братман В. Л., Калынов Ю. К., Федотов А. Э.* К теории гироприборов с тонкими электронными пучками (гиротрон с большими орбитами) // ЖТФ, в печати.

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

ИЯФ СО РАН, ИПФ РАН

М. А. Агафонов, А. В. Аржанников, В. Б. Бобылев, Н. С. Гинзбург, Н. Ю. Песков, С. Л. Синицкий

Одним из путей повышения мощности мазеров на свободных электронах может явиться увеличение одного из поперечных размеров области взаимодействия пучка с электромагнитной волной при сохранении локальных параметров пучка на достигнутом в настоящее время уровне. В этой связи большой практический интерес представляет использование сильноточных релятивистских электронных пучков ленточной геометрии. Характерный энергозапас таких пучков с энергией частиц ~ 1 МэВ может достигать 0,5 МДж при длительности импульса около 10 нс [1]. В данном проекте на основе таких пучков предполагается реализовать мазер на свободных электронах (МСЭ) гигаваттного уровня мощности. При этом проблема получения когерентного излучения при большой ширине пучка должна решаться путем использования двумерной распределенной обратной связи (РОС) [2]. При умеренной ширине пучка (10–20 длин волн) пространственная когерентность излучения может быть обеспечена традиционной одномерной РОС.

Схема экспериментов на сильноточном микросекундном ускорителе У-2 [1] приведена на рис. 1. Продольное магнитное поле в щелевом вакуумном канале создается катушкой, которая намотана поверх вакуумной камеры, и может варьироваться в пределах от 3 до 13 кГс. Поперечная (ондуляторная) составляющая поля формируется за счет помещения в вакуумную камеру брусков из материала с большой магнитной восприимчивостью, которые укладываются в нее вдоль ширины пучка, т. е. по координате Y на рис. 1. При таком способе формирования поперечной компоненты магнитного поля ее амплитуда сохраняется на уровне около 1 кГс при изменении продольного поля во всем указанном диапазоне от 3 до 13 кГс.

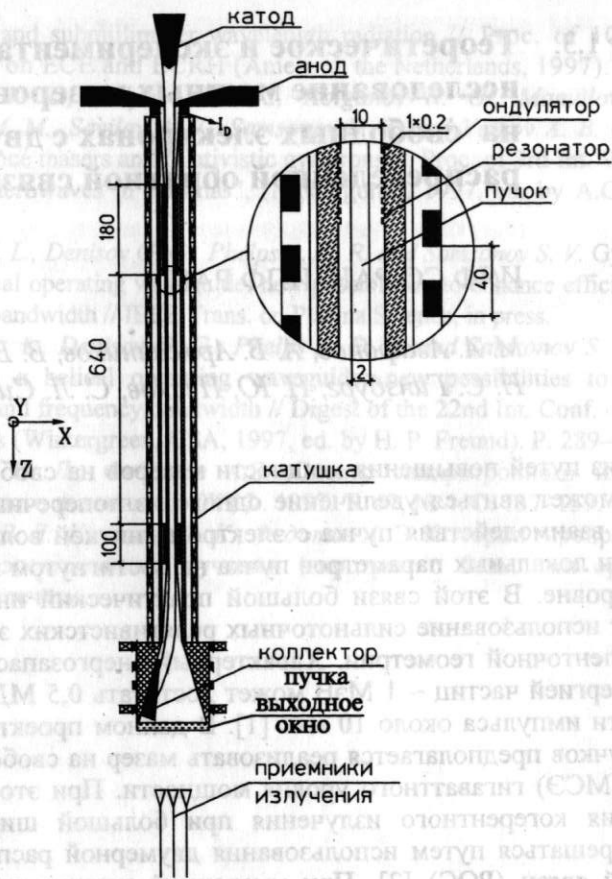


Рис. 1. Схема эксперимента по генерации миллиметрового излучения

Селекцию колебаний по длине волны позволяют осуществлять одномерные брэгговские решетки. В проведенных за истекший год экспериментах резонатор МСЭ состоял из пары входных медных решеток, имеющих длину гофрированной поверхности 180 мм, и пары выходных с длиной гофрировки 100 мм. Период гофрировки – 2 мм, глубина – 0,2 мм. Расстояние между входными и выходными решетками варьировалось в эксперименте от 32 до 64 см.

Результаты измерения селективных свойств резонатора при длине регулярной части 32 см приведены на рис. 2. Видно, что данный резонатор осуществляет довольно хорошую селекцию излучения по длине волны.

В экспериментах, схема которых представлена на рис. 1, ленточный пучок генерировался в магнитно-изолированном диоде, проходил через область взаимодействия с излучением и затем сбрасывался вбок на принимающий коллектор за счет быстрого поперечного магнитного поля, которое создавалось специальными витками с временем нарастания тока в них около 10 мкс [3]. Генерируемое в вакуумном канале миллиметровое излучение выводилось в атмосферу через фторопластовое окно толщиной 10 мм и после ослабления принималось калиброванными детекторами. Интегральный по времени энергозапас в СВЧ-излучении измерялся калориметром, который представлял собой пластину из поглощающей излучение резины с медь-константановыми термопарами, измеряющими ее температуру.

Результаты экспериментов по генерации миллиметрового излучения [4] представлены на рис. 3. Данная серия осциллограмм получена при напряженности ведущего поля, близкой к оптимальному значению, найденному при компьютерном моделировании ($V_{||} = 9,2$ кГс). В данном эксперименте МСЭ запитывался ленточным РЭП с амплитудой тока свыше 3 кА, поперечным сечением $0,2 \times 12$ см и длительностью до 5 мкс. Как видно из осциллограмм на рис. 3, напряжение на диоде поддерживалось на уровне 0,9 МВ около 3 мкс. Ток пучка в канале в течение этого времени практиче-

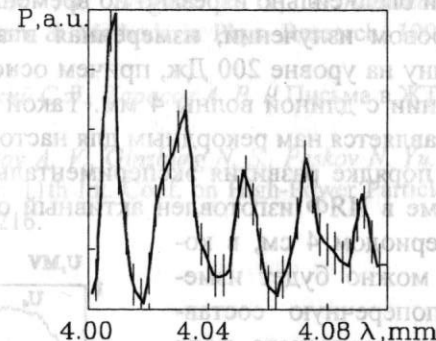


Рис. 2. Зависимость плотности энергии излучения в резонаторе от длины волны излучения, вводимого от внешнего генератора

ски монотонно нарастал с 1,5 до 3 кА. Таким образом, погонный ток пучка во время генерации излучения был от 0,12 до 0,25 кА/см. Генерация миллиметрового излучения продолжалась в течение времени, пока напряжение на диоде оставалось на одном уровне, т. е. около 3 мкс, и было сильно изрезано по времени импульса. Энергия в миллиметровом излучении, измеренная в этих экспериментах, имеет величину на уровне 200 Дж, причем основная ее доля содержится в излучении с длиной волны 4 мм. Такой уровень энергосодержания представляется нам рекордным для настоящего времени.

В порядке развития экспериментальных исследований по данной теме в ИЯФ изготовлен активный ондулятор с пространственным периодом 4 см, в котором можно будет изменять поперечную составляющую магнитного поля в пределах от 0 до 2 кГс. Для избежания влияния пробоя на выходном окне на регистрацию выходящего миллиметрового излучения к выходу генератора будет присоединен вакуумный объем, в котором будут размещены диагностики излучения. Кроме этого, в ИЯФ СО РАН предложен фотохимический способ изготовления двойкопериодических решеток и где в резонатор изготовлены опытные образцы таких резонаторов. Экспериментальное исследование МСЭ с двумерной РОС планируется осуществить в 1998 году.

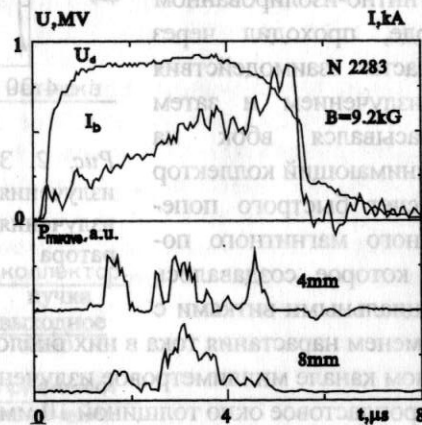


Рис. 3. Осциллограммы, характеризующие генерацию ленточным РЭП излучения с длинами волн 4 и 8 мм в резонаторе с одномерной обратной связью. U_d — напряжение на диоде, I_b — ток пучка на входе в резонатор

Литература

1. Arzhannikov A. V., Bobylev V. B., Nikolaev V. S., Sinitsky S. L., Tarasov A. V. // 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., Sinitsky S. L. // Nucl. Instrum. & Methods in Phys. Research. 1995. A358. P. 189–192.
3. Аржанников А. В., Синицкий С.Л., Тарасов А. В. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20, вып. 4. С. 50–54.
4. Agafonov M. A., Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Peskov N. Yu., Sinitsky S. L., Tarasov A. V. // Proc. 11th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Prague, 1996. V. I. P. 211–216.

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

ИЯФ им. Г. И. Будкера

*И. А. Запрягаев, 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*

Целью проекта в 1997 г. являлось продолжение работ по совершенствованию и изучению импульсного 7-гигагерцового магникона, созданного в ИЯФ в качестве альтернативного микроволнового источника для линейных коллайдеров.

Импульсный магникон является продолжением работ по созданию мощных микроволновых источников нового класса для ускорителей [1, 2, 3]. Основным отличием устройств данного класса является способ модуляции пучка – круговая развертка пучка релятивистских электронов.

Конструкция прибора была выбрана по результатам численного моделирования и экспериментального исследования различных вариантов прибора (см. [4, 8]). Расчеты динамики пучка и оптимизация элементов магникона (электронная пушка, ВЧ-резонаторы, магнитная система) проводились специальными программами SAM и SuperLANS [5, 6]. Использовались также программы для расчета установившегося и переходного режима работы магникона [7, 8].

В предыдущих испытаниях прибора было установлено, что ограничения его параметров связаны с плохим согласованием оптики электронного источника с магнитной системой магникона и с искажением ВЧ-поля в выходном резонаторе [4].

Плохое согласование оптики пушки с магнитной системой приводило к сильным пульсациям поперечного размера электронного пучка. В 1996 г. модернизировали электронную пушку. Это позволило уменьшить пульсации, а максимальный измеренный диаметр

– более 300 нс.

пучка в рабочем диапазоне сопровождающего магнитного поля уменьшился с 4 мм до расчетной величины (менее 3 мм).

Резонаторы ВЧ-системы магникона соединены друг с другом посредством индиевых уплотнений, что позволяет производить оперативную замену отдельных частей, но препятствует возможности прогрева резонаторов до высоких температур. Результатом является значительное время тренировки резонаторов. Причем в процессе тренировки резонаторов происходит самовозбуждение их на различных частотах, не кратных частоте входного сигнала [5]. Для улучшения вакуума в приборе ВЧ резонаторы предварительно прогревались, а затем производилась быстрая сборка магникона в целом. Кроме того, волноводный тракт, образующий вместе с нагрузками и выходным резонатором единый вакуумный объем (керамическое окно отсутствует), был снабжен дополнительной системой откачки. Дальнейшие эксперименты показали, что эти меры сократили время тренировки прибора и устранили самовозбуждение. Достигнутые к настоящему времени параметры магникона перечислены ниже в таблице. Для сравнения там же приведены расчетные значения.

Параметры магникона	Получено	Расчет
Рабочая частота, ГГц	7,002	7,000
Входная частота, ГГц	3,501	3,500
Выходная мощность, МВт	46	55
Усиление, дБ	62	55
КПД, %	49	56
Длительность импульса, мкс	1,0	1,3
Напряжение пучка, кВ	405	420
Ток пучка, А	230	240
Частота повторения, с ⁻¹	3	5

Таким образом, измеренная эффективность прибора составляет 89%, а длительность импульса – 77% от проектных значений. Основной причиной отличия полученного результата от расчетного является продольная и азимутальная нерегулярность ВЧ-полей в выходном резонаторе, вызванная наличием отверстий связи с волноводами [9]. Азимутальная нерегулярность ведет к различию на-

груженных добротностей ортогональных ТМ₂₁₀ мод, суперпозиция которых определяет распределение ВЧ-полей в выходном резонаторе.

Проведенные численные расчеты показывают, что различие между нагруженными добротностями также снижает длительность сигнала при работе прибора в режиме, близком к оптимальному [10]. Укорочение длительности импульса объясняется также неидеальностью импульса напряжения на пушке. Численное моделирование показывает, что для данной формы импульса напряжения на электронной пушке длительность выходного сигнала не может превышать 1,3 мкс на уровне половинной мощности.

Для компенсации азимутального возмущения, вызванного окнами связи, в данном эксперименте использовался выходной резонатор с двумя компенсирующими отверстиями. Однако, как показало 2D-моделирование, этого недостаточно. Решение проблемы заключается в увеличении числа отверстий-компенсаторов. Однако численное моделирование и макетные испытания показали, что увеличение числа азимутальных отверстий приводит к значительному продольному искажению распределения ВЧ-полей. Для данной конструкции магникона такое искажение распределения полей приводит к заметному снижению эффективности. Для устранения этого эффекта в выходном резонаторе, который в настоящее время изготовлен и установлен в магниконе, сделаны компенсирующие проточки вблизи верхнего и нижнего торцов. Проточки азимутально однородны и не вызывают азимутальной нерегулярности.

Кроме того, в процессе исследований магникона было выяснено, что управляющая характеристика прибора сильно нелинейна, а частотная характеристика не достаточно широка [10]. Для улучшения ситуации в будущем потребуется усовершенствование системы развертки пучка.

Таким образом, в последней серии экспериментов на 7-гигагерцовом магниконе-удвоителе была достигнута выходная пиковая мощность 46 МВт при 49% КПД, что составляет 89% от расчетных значений. Полученные результаты позволяют рассматривать магникон в качестве возможного источника для применения в линейных коллайдерах. Улучшенный вариант выходного резонатора изготовлен и установлен в магникон. Прибор находится в стадии запуска, надеемся в ближайшее время получить проектные параметры.

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. Nezhevenko O. A. // IEEE Trans. of Plasma Science. 1994. V. 22, № 5. C. 756–772.
4. Kozyrev E. V. et al. // Proc. of the Third Workshop on Pulsed RF Sources for Linear Colliders. 1996. C. 234–242.
5. Kozyrev E. V. et al. // Particle Accelerators. 1996. V. 55. C 55–64.
6. Fomel B., Tiunov M. and Yakovlev V. // Proc. XIII Int. Conf. on High-Energy Acc. 1987. V. 1. C. 353–355.
7. Myakishev D. and Yakovlev V. // Proc. of Part. Acc. Conf. Dallas, 1995.
8. Yakovlev V. et al. // Proc. of Part. Acc. Conf. Dallas, 1995.
9. Kozyrev E. V. et al. // AIP Conf. Proc. 398, Woodbury, N.Y., 1997. P. 832–841.
10. Kozyrev E. V. et al. 7 Ghz Pulsed Magnicon: Study and New Results // Proc. of Part. Accel. Conf. (PAC'97), 1997 (to be published).