

10;12

Демонстрация работы мощного 30-GHz мазера на свободных электронах на резонансную нагрузку

© А.К. Каминский, Э.А. Перельштейн, С.Н. Седых, Н.С. Гинзбург,
С.В. Кузиков, Н.Ю. Песков, А.С. Сергеев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород
E-mail: peskov@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 2 октября 2009 г.

Реализован эффективный узкополосный мазер на свободных электронах (МСЭ) с обратным ведущим магнитным полем и высокоселективным брэгговским резонатором со скачком фазы гофрировки. Получено излучение на частоте 30 GHz с выходными характеристиками (мощность, длительность импульса, ширина спектра, стабильность режима генерации), которые позволяют использовать МСЭ для тестирования электродинамических компонентов разрабатываемых электрон-позитронных суперколлайдеров. Проведены эксперименты по запитке высокодобротного резонатора, с помощью которого моделируется деградация поверхности ускоряющей структуры коллайдера CLIC (ЦЕРН) в результате тепловой усталости при многократном ($\sim 10^5$) воздействии СВЧ-импульсов.

Одним из приложений мощных СВЧ-источников является тестирование компонентов высокоградиентных ускорителей нового поколения. В настоящее время интенсивно ведутся работы над следующим поколением линейных электрон-электронных коллайдеров тэвного диапазона энергий (проекты ILC, SLAC, CLIC). Рабочие частоты в этих проектах перекрывают диапазон от 1 до 12 GHz. В то же время переход в более коротковолновый (миллиметровый) диапазон длин волн привлекателен возможностью увеличения ускоряющего градиента. Этот переход, однако, затрудняется усугублением проблемы деградации поверхности металлов при импульсном ВЧ-нагреве.

Данная статья посвящена созданию экспериментального стенда для тестирования высокоградиентных ускоряющих структур под воздействием мощных 30-GHz импульсов и, в частности, для исследования

эффекта деградации поверхности меди при импульсных ВЧ-нагрузках. Эффект старения возникает вследствие циклического ВЧ-нагрева, сопровождающегося механическими напряжениями при неоднородном температурном расширении поверхностного слоя металла, который вызван скин-эффектом [1,2]. В качестве ВЧ-источника использовался МСЭ-генератор, реализованный в совместных экспериментах ОИЯИ и ИПФ РАН, с мощностью $\sim 20\text{--}30\text{ MW}$, длительностью импульса $150\text{--}200\text{ ns}$ и частотой следования импульсов до 1 Hz . Для моделирования импульсного нагрева было предложено использовать тестовый резонатор, подбором добротности которого можно было добиваться необходимых интенсивностей ВЧ-полей ($\sim 100\text{ MV/m}$), реализующихся в ускоряющей структуре коллайдера CLIC (ЦЕРН). При достигнутых параметрах излучения в тестовых резонаторах с различным внутренним профилем получен нагрев поверхности металла в течение ВЧ-импульса от 50 до 250°C . В статистике $\sim 10^5$ импульсов продемонстрирована эффективная работа МСЭ с нагрузкой высокодобротным ($Q \sim 1500$) тестовым резонатором.

Условная схема реализованного МСЭ-генератора изображена на рис. 1, а. Линейный индукционный ускоритель ЛИУ-3000 (ОИЯИ) формировал электронный пучок с энергией 0.8 MeV , током $150\text{--}200\text{ A}$ и длительностью до 250 ns с частотой повторения до 1 Hz , который инжектировался в МСЭ-генератор, помещенный в соленоид. Раскачка осцилляторной скорости частиц осуществлялась в винтовом токовом ондуляторе с периодом 6 cm , имеющем участок плавного нарастания поля на первых 6 периодах. В области ВЧ-взаимодействия амплитуда ондулятора поля составляла около 1 kG и ведущего магнитного поля $\sim 2\text{ kG}$.

В качестве рабочего режима МСЭ был выбран режим обратного ведущего магнитного поля [3,4]. В этом режиме направление вращения электронов в поле винтового ондулятора противоположно направлению их вращения в ведущем поле. Моделирование показывает [5,6], что этот режим оптимален с точки зрения снижения чувствительности к разбросу параметров релятивистских электронных пучков и соответственно достижения высокого электронного КПД. Это подтверждено в предшествующих экспериментальных исследованиях МСЭ-генератора [6–8].

Электродинамическая система МСЭ основана на брэгговском резонаторе со скачком фазы гофрировки [9,10], обеспечивающем селективное возбуждение рабочей моды. Высокая селективность резонатора

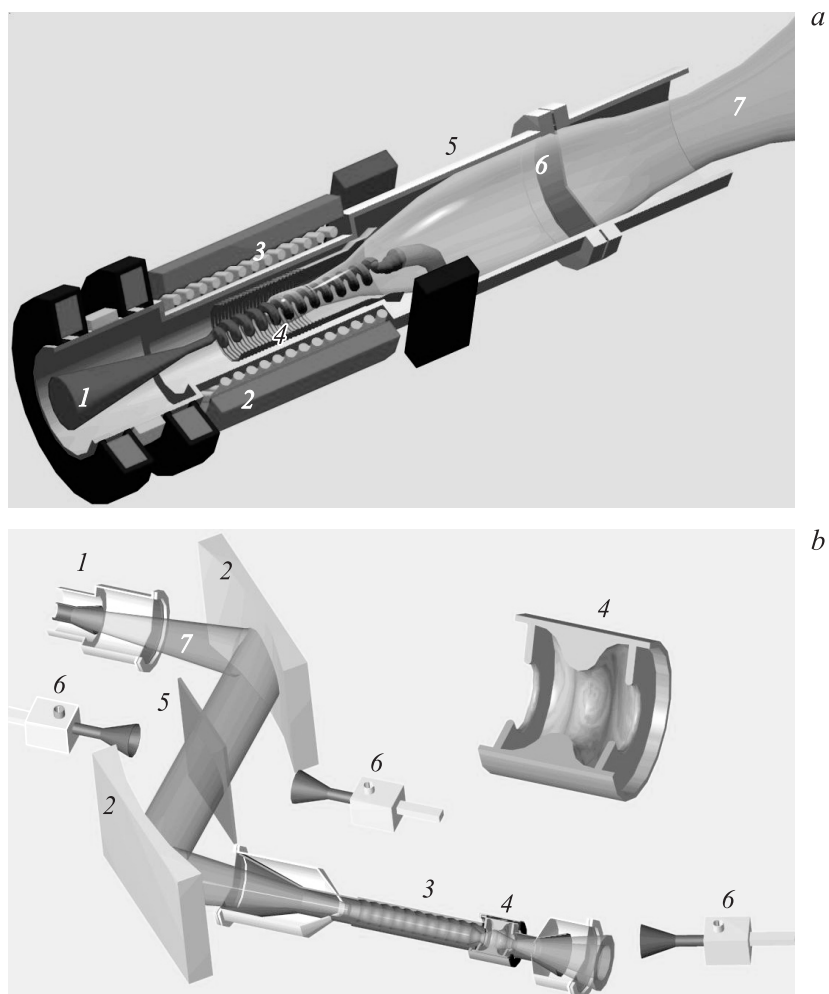


Рис. 1. *a* — схема ОИЯИ-ИПФ МСЭ: 1 — электронный пучок, 2 — соленоид, 3 — винтовой ондулятор, 4 — брэгговский резонатор, 5 — выходная секция, основанная на эффекте Тальбота, 6 — вакуумное окно, 7 — волновой пучок. *b* — схема экспериментальной установки по исследованию эффекта поверхностного нагрева: 1 — выходная секция МСЭ, 2 — квазиоптическая линия передачи, 3 — преобразователи мод, 4 — тестовый резонатор, 5 — диэлектрический ответвитель, 6 — ВЧ-детекторы, 7 — волновой пучок.

данного типа обусловлена существованием основной моды, которая расположена внутри брэгговской зоны непрозрачности. Это обеспечивает стабильный режим одномодовой одночастотной генерации в МСЭ при высокой эффективности энергообмена частиц с ВЧ-волной [7,8].

В описываемом эксперименте резонатор был составлен из двух гофрированных волноводных секций со средним диаметром 1.9 см и длинами 30 см (входная секция) и 15 см (выходная секция), которые имели скачок фазы π в месте их сочленения. Резонатор обеспечивал обратную связь для рабочей волны $TE_{1,1}$ со встречной волной $TM_{1,1}$ в окрестности частоты 30 GHz.

На выходе пространства взаимодействия МСЭ располагался конический рупор, обеспечивающий трансформацию рабочей волны МСЭ $TE_{1,1}$ в гауссов пучок. Рупор имел выходной диаметр 7 см и осуществлял инжекцию гауссова пучка в соосный рупору сверхразмерный волновод круглого поперечного сечения диаметром 10 см. Использование эффекта Тальбота в сверхразмерном волноводе [11] обеспечивало повторение гауссова пучка на выходном конце, отстоящем на расстоянии около 90 см от выхода рупора, с эффективностью около 95%. Барьерное (вакуумное) окно располагалось на расстоянии 55 см от начала волновода в сечении с минимальной плотностью поперечного распределения ВЧ-поля. Этим достигались минимально возможные значения ВЧ-полей на окне с целью недопущения возникновения ВЧ-пробоя [12].

Экспериментальная установка для исследования эффекта поверхностного нагрева (рис. 1, *b*) включала в себя двухзеркальную конфокальную передающую линию, обеспечивающую пространственную фильтрацию излучения, и необходимые преобразователи мод, которые осуществляли транспортировку ВЧ-мощности в тестовый резонатор, расположенный на расстоянии около 2 м от выхода МСЭ. Медный тестовый резонатор состоял из двух диафрагм и секции профилированного волновода между ними и был спроектирован для моделирования тепловых нагрузок, возникающих в ускоряющей структуре проекта СЛС. В качестве рабочей моды резонатора выбрана электропрочная мода $TE_{0,1,1}$, позволяющая наблюдать тепловые эффекты в „чистом виде“, т. е. в отсутствие нормальных составляющих ВЧ электрического поля, которые могут вызывать поверхностный ВЧ-пробой. Для достижения требуемых значений полей и температуры на поверхности металла нагружения добротность резонатора Q_{load} была выбрана равной 1500.

Дальнейшее увеличение добротности ограничено удлинением переходных процессов и, следовательно, снижением эффективности процесса накопления энергии. В середине между диафрагмами профилированная секция имела узкий поясок (выпуклый участок поверхности с небольшим радиусом кривизны), на котором достигалось максимальное значение магнитной компоненты ВЧ-поля, величина которого зависит от локального радиуса кривизны поверхности. Уменьшение радиуса кривизны позволяет увеличивать максимальное значение поля и соответственно пиковую температуру нагрева при одновременном сужении нагреваемого участка. В этой связи радиус кривизны выбирался таким образом, чтобы ширина рабочей области, в которой температура отличается от максимальной не более чем на 10%, составляла ~ 0.5 mm. Была предусмотрена механическая подстройка частоты тестового резонатора под частоту излучения МСЭ. Дополнительный диэлектрический ответвитель был спроектирован для контроля амплитуд падающего и отраженного от резонатора импульсов.

Очевидно, что работа МСЭ на резонансную нагрузку сопряжена с нежелательными переходными процессами, в частности отражением части импульса СВЧ назад в генератор. Однако выходу на эффективный стационарный режим генерации способствует развязка в виде $\sim 15\%$ потерь при передаче излучения от МСЭ к тестовому резонатору, а также заметная временная задержка при пробеге излучения от МСЭ к резонатору и обратно (около 12 ns). Для исследования влияния этих факторов было проведено моделирование работы МСЭ на резонансную нагрузку в рамках пространственно-временного подхода, описанного в [13], при параметрах, близких к условиям описанных экспериментов. Результаты моделирования приведены на рис. 2. Согласно расчетам, в начале СВЧ-импульса возникает практически полное его отражение. Однако при условии равенства частоты СВЧ-генерации и собственной частоты резонатора процесс накопления энергии в тестовом резонаторе сопровождается уменьшением амплитуды отраженной волны практически до нуля. В результате происходит установление режима стационарной генерации МСЭ с высоким КПД. Накопленная величина поля в тестовом резонаторе превосходит амплитуду поля падающей волны примерно в \sqrt{Q} раз.

При отстройке частоты резонатора от частоты генерации МСЭ происходит выход на режим с ненулевым отражением от тестового резонатора. Однако если сдвиг между частотой генерации и тестового

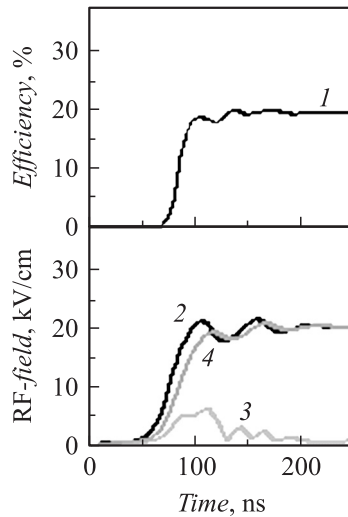


Рис. 2. Моделирование работы МСЭ на резонансную нагрузку, собственная частота которой согласована с частотой генерации. Зависимость от времени: 1 — электронного КПД, 2 — амплитуда волны на выходе МСЭ, 3 — отраженной и 4 — прошедшей через нагрузку волн.

резонатора меньше величины его обратной добротности, то отраженный сигнал мал и его влияние на КПД генератора и накопление СВЧ-мощности в тестовом резонаторе незначительно. При большей отстройке частоты тестового резонатора отражение настолько сильно, что начинает оказывать существенное влияние на процесс генерации МСЭ вплоть до срыва автоколебаний. В результате проникающая в тестовый резонатор ВЧ-энергия мала [13].

Результаты экспериментального исследования ОИЯИ-ИПФ МСЭ-генератора приведены на рис. 3. Типичная осциллограмма ВЧ-импульса и соответствующий спектр сигнала показаны на рис. 3, а. Частота излучения составляла 29.92 GHz при ширине спектра 6–7 MHz, что близко к естественной ширине линии генератора. Были зарегистрированы два различных режима работы МСЭ (настройка которых осуществлялась изменением полей ондулятора и соленоида): а) с мощностью 30–35 MW при длительности импульса до 100 ns, б) с мощностью око-

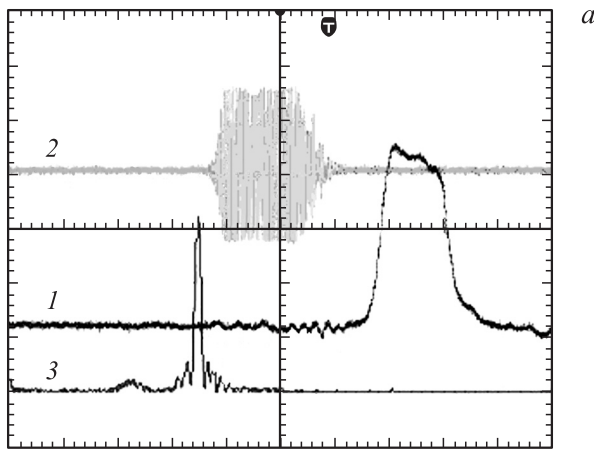


Рис. 3. Результаты экспериментального исследования. *a* — МСЭ в свободном режиме генерации, типичная осциллограмма: 1 — ВЧ-импульса (вертикальная развертка 6 MW/div., горизонтальная развертка 100 ns/div.), 2 — гетеродинированного сигнала и 3 — его частотного спектра (горизонтальная развертка 50 MHz/div.). *b* — работа МСЭ-генератора на высокочастотную нагрузку, лучи: 1 — ток пучка, инжектируемого в МСЭ (60 A/div.); 2 — ВЧ-импульс на выходе МСЭ (5 MW/div.); 3 — ВЧ-импульс, отраженный от тестового резонатора (15 MW/div.); 4 — ВЧ-импульс, прошедший через тестовый резонатор (0.75 MW/div.); горизонтальная развертка 100 ns/div. *c* — статистическое распределение мощности (слева) и длительности импульсов (справа) на выходе тестового резонатора в типичной последовательности 10^4 импульсов.

до 20 MW при длительности импульса до 200–220 ns. Таким образом, достигнут энергезапас в одиночном импульсе на уровне ~ 4 J. При увеличении выходной мощности наблюдались ВЧ-пробой в системе, которые сопровождалась уменьшением длительности генерируемых импульсов. Для измерения мощности микроволновых импульсов были использованы калориметры различных конструкций.

Проведенное „холодное“ и „горячее“ тестирование всех компонентов экспериментального стенда по исследованию деградации поверхности меди показало хорошее соответствие с расчетными параметрами. Коэффициент передачи по мощности с выхода МСЭ на вход тестового резонатора составил около 85%, коэффициент прохождения после

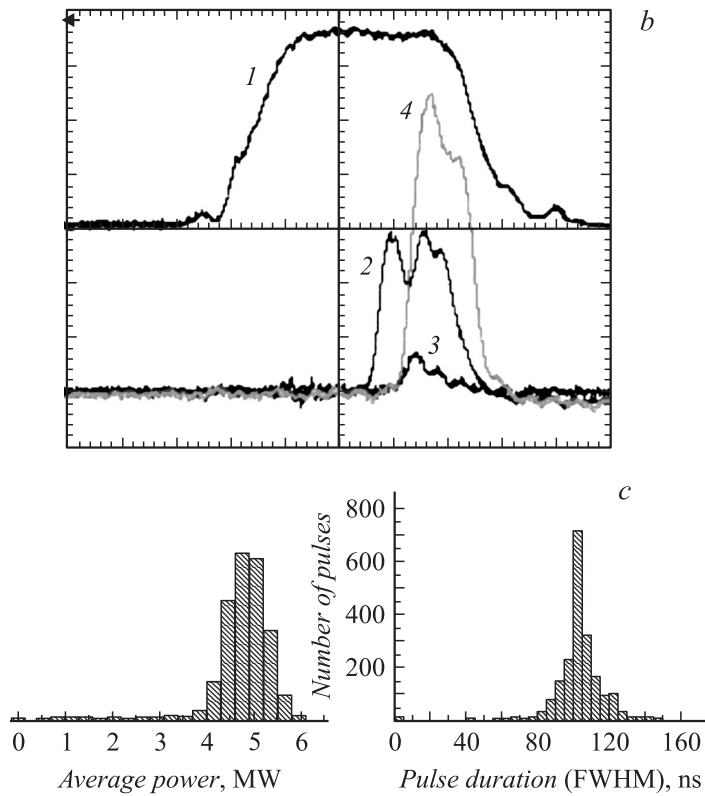


Рис. 3 (продолжение).

резонатора был измерен на уровне 25–30%. Как отмечалось выше, определенный уровень потерь в передающем тракте необходим для стабилизации работы МСЭ. Температура меди в резонаторе восстанавливалась по осциллограмме прошедшего через тестовый резонатор сигнала и показаний калориметра. После определенного числа ВЧ-импульсов резонатор извлекался, а его „поясок“ изучался с помощью микроскопа для определения признаков деградации его поверхности.

Проведенные эксперименты (рис. 3, *b*) подтвердили принципиальную возможность работы МСЭ-генератора на резонансную нагрузку.

Видно, что в соответствии с моделированием при совпадении собственной частоты тестового резонатора с частотой генерации МСЭ в течение СВЧ-импульса происходит уменьшение отражения от нагрузки (просветление), увеличение прошедшего сигнала и, таким образом, накопление в нагрузке ВЧ-энергии.

В первых экспериментах использовался тестовый резонатор, обеспечивающий при указанных параметрах МСЭ максимальный нагрев поверхности в течение каждого импульса до 50°C на поясе шириной $\sim 1\text{ mm}$. Проведенное исследование этого резонатора под воздействием последовательности 10^5 ВЧ-импульсов показало приемлемую стабильность работы МСЭ. Статистика мощности и длительности ВЧ-импульсов в двух сериях по 10^4 импульсов в каждой приведена на рис. 3, с. Однако, в соответствии с оценками [14], при данной температуре визуальных изменений поверхности не наблюдалось.

Оптимизация профиля поверхности тестового резонатора (более острый поясок, на котором при той же мощности излучения достигается большее значение магнитного поля) позволила получить увеличение температуры стенки в течение импульса до $200\text{--}220^{\circ}\text{C}$ в области шириной $\sim 0.5\text{ mm}$. В настоящее время начаты эксперименты по набору статистики при различных температурах нагрева поверхности.

Авторы признательны проф. М.И. Петелину за полезные обсуждения и постоянный интерес к работе.

Исследования поддержаны грантами РФФИ (гранты № 07-02-00617, 09-02-00422 и 09-08-00743).

Список литературы

- [1] *Pritzkau D.P., Siemann R.H.* // Phys. Rev. ST-AB. 2002. V. 5. P. 112002.
- [2] *Wuensch W.* // High-Gradient Collaboration Workshop. Maryland, January 23–24, 2008.
- [3] *Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Rubin S.B.* // Particle Accelerators. 1990. V. 33. P. 189.
- [4] *Conde M.E., Bekefi G.* // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67 (22). P. 3082.
- [5] *Peskov N.Yu., Samsonov S.V., Ginzburg N.S., Bratman V.L.* // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A. 1998. V. A407. P. 107.
- [6] *Ginzburg N.S., Kaminsky A.K., Kaminsky A.A. et al.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1998. V. 26. N 3. P. 536.

- [7] *Песков Н.Ю., Гинзбург Н.С., Каминский А.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 11. С. 19.
- [8] *Ginzburg N.S., Kaminsky A.A., Kaminsky A.K.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 3574.
- [9] *Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Резников М.Г.* Резонатор // Авт. свид. № 720592. Бюл. № 9. 1980.
- [10] *Bratman V.L., Denisov G.G., Ginzburg N.S., Petelin M.I.* // IEEE J. Quant. Electr. 1983. V. QE-19 (3). P. 282.
- [11] *Denisov G.G., Kuzikov S.V.* // Strong Microwaves in Plasmas—2000. V. 2. / Ed. by A.G. Litvak. IAP RAS. N. Novgorod, 2000. P. 960.
- [12] *Елжов А.В., Гинзбург Н.С., Каминский А.К.* и др. // Письма ЭЧАЯ. 2004. Т. 1. № 3. С. 18.
- [13] *Гинзбург Н.С., Каминский А.К., Кузиков С.В.* и др. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 7. С. 69.
- [14] *Кузиков С.В., Плоткин М.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 10–11. С. 979.