

УДК 621.385.623

ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

*В. В. Ростов*¹, *Р. В. Цыганков*^{1*}, *А. С. Степченко*¹, *О. Б. Ковальчук*¹, *К. А. Шарыпов*²,
*С. А. Шунайлов*², *М. Р. Ульмаскулов*², *М. И. Яландин*²

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск;

² Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Предложена и исследована схема генератора микроволновых импульсов в диапазонах частот около 37 и 73 ГГц, в которой сочетаются взаимодействие электронов как с (-1) -й гармоникой встречной волны TM_{02} , так и с синхронной замедленной волной TM_{01} в секционированной замедляющей системе со средним диаметром $2,5\lambda$. Эффективная модуляция тока на входе замедляющей системы обеспечивается в области катод-анодного зазора и секции согласования, которая понижает дифракционные потери потока энергии, направленного в сторону катода. Численное моделирование показывает, что эффективность преобразования мощности электронного пучка в микроволновое излучение составляет до 50%. Эксперименты демонстрируют устойчивый режим генерации субгигаваттных импульсов при эффективности более 40% в верхней части миллиметрового диапазона с воспроизводимой пространственной структурой волны, отвечающей преимущественно волне TM_{01} на входе в излучающий рупор.

ВВЕДЕНИЕ

Мощные источники наносекундных импульсов излучения в миллиметровом диапазоне длин волн представляют интерес во многих областях физики плазмы [1–4]. Очевидно, что сфера применения таких источников может быть существенно расширена при условии создания компактных систем с высокой эффективностью генерации [5, 6]. Действительно, достигнутый мультигигаваттный уровень мощности излучения в длинноволновой части миллиметрового диапазона с помощью очень крупных ускорителей [7] оказался неостребованным. Примерно в то же самое время уровень мощности, получаемый на основе компактного ускорителя RADAN-303, был почти на два порядка ниже [8]. Однако уже спустя десять лет была освоена схема генератора с диаметром замедляющей структуры $D \approx 1,6\lambda$, когда импульсная мощность на длине волны $\lambda \approx 8$ мм могла достигать около 200 МВт, уступая лишь один порядок генератору, описанному в работе [9]. В настоящее время уровень генерируемой мощности порядка 1 ГВт [5] доступен для относительно малоразмерного ускорителя SINUS-200, главным образом благодаря росту эффективности преобразования энергии электронного пучка в энергию волны, а также применению комбинации методов селекции мод (которые начали использовать в лазерных системах [10–13]) для случая $D \approx 2,5\lambda$.

1. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Геометрия замедляющей структуры генератора, используемая в 8-миллиметровом диапазоне длин волн в моделировании с помощью кода KARAT с размерностью 2,5 [14], показана на рис. 1а.

* mincemeat@rambler.ru

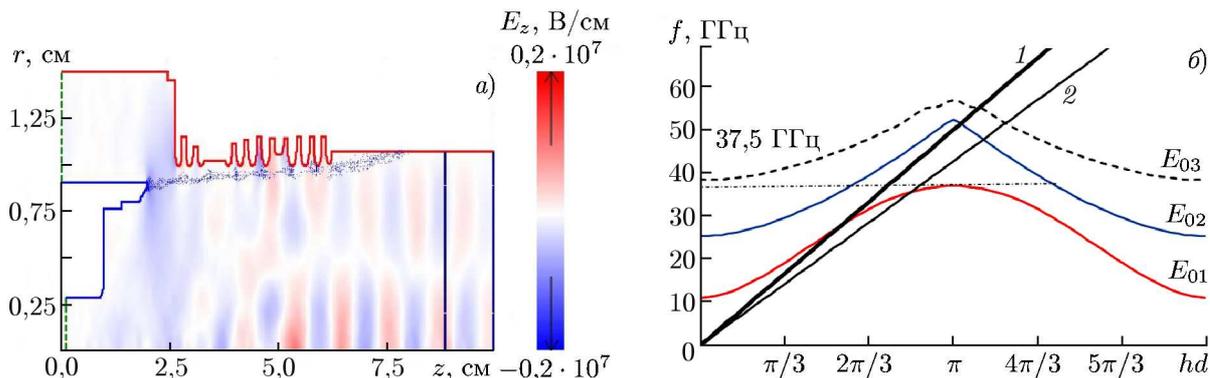


Рис. 1. Панель *a*: схема генератора и распределение высокочастотного поля. Панель *б*: дисперсионная диаграмма для генератора с длиной волны 8 мм (1 — линия света, 2 — линия $\beta = 0,8$, β — энергия пучка)

Эта геометрия в целом подобна геометрии прототипа, который успешно протестирован ранее в 3-сантиметровом диапазоне длин волн и показал эффективность около 30% и более (в сильных магнитных полях) [15]. Выбран средний диаметр замедляющей структуры $D \approx 2,5\lambda$, при котором можно говорить о двухволновом взаимодействии электронов в ней. Действительно, для такого диаметра замедляющей структуры волна TM_{01} , замедленная вблизи границы полосы пропускания до скорости, примерно равной скорости электронов, имеет сильную связь с волной TM_{02} , а последняя может переносить основной поток энергии и обеспечивать обратную связь. Волна TM_{03} не распространяется в рассматриваемом диапазоне частот. Из-за относительно большой расстройки черенковского синхронизма в короткой замедляющей структуре обе моды могут участвовать во взаимодействии с электронным пучком. Поэтому возник термин «двухволновое взаимодействие» [15, 16]. В схеме реализована идея модуляции электронного пучка по энергии непосредственно в ускоряющем зазоре и коротком согласующем отрезке электродинамической системы. Это некоторое приближение к случаю, рассмотренному в работе [17], где впервые было предложено и теоретически изучено использование автомодуляции тока вблизи катода для нерелятивистской лампы обратной волны («карсинограда»). Как можно видеть на рис. 1*a*, на входе замедляющей структуры имеет место сильная модуляция тока пучка. Пучок релятивистских электронов может возбуждать в замедляющей структуре симметричные волны TM_{01} и TM_{02} .

Дисперсионная характеристика для бесконечной замедляющей структуры показана на рис. 1*б*. Нормированная на скорость света фазовая скорость волны TM_{01} вблизи верхней границы полосы пропускания имеет значение 0,75. Горизонтальная штриховая линия на рис. 1*б* (соответствующая частоте 37,3 ГГц) пересекает кривую (-1) -й пространственной гармоники волны TM_{02} при фазовой скорости всего 0,56. Отметим, что при $D > (2 \div 3)\lambda$ в выходном излучении обычно наблюдается смесь мод. Соотношение их амплитуд без принятия специальных мер обычно нестабильно из-за девиации параметров электронного пучка во время импульса и от выстрела к выстрелу [7]. Поэтому секционирование замедляющей структуры является продуктивным способом повышения когерентности. Фазовый скачок гофрировки в середине замедляющей структуры корректирует продольную структуру полей, а также соотношение мод вблизи π -вида со смещением частоты автоколебаний вверх [15]. Для того, чтобы на выходе доминирующей была мода TM_{01} , привлекается дополнительное резонансное условие. Так, для частоты около 36,4 ГГц волноводная длина волны моды TM_{02} примерно равна $L_{1/2} \approx 4d$ ($L_{1/2}$ — длина одной из двух секции замедляющей структуры). Тогда для продольных волновых чисел $h_j \equiv 2\pi/\lambda_w^{(j)}$, $j = 1, 2$, имеем: $h_1 \approx \pi/d$ и $h_2 \approx 2\pi/L_{1/2}$, где d — период гофрировки (3 мм). Отсюда получается соотношение для продольных

волновых чисел $h_1 - h_2 \approx 2\pi/L_{1/2}$. Такое условие способствует упомянутому выше распределению функций между двумя волнами и эффективному преобразованию волн TM_{01} и TM_{02} : в первой секции замедляющей структуры возбуждаемая пучком попутная волна TM_{01} эффективно отражается в объёмную встречную волну TM_{02} , которая, в свою очередь, может практически исчезать на выходе второй секции замедляющей структуры.

В результате секционирования реализуется низкочастотное рабочее колебание с уменьшенной (примерно в 2 раза) амплитудой электрических полей по сравнению со случаем однородной замедляющей структуры. Моделирование методом частиц в ячейке показало коэффициент полезного действия (КПД) до 50%.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В первой серии экспериментов исследовалась генерация импульсов миллиметрового диапазона с частотой 36,4 ГГц на ускорителе SINUS-200.

Для регистрации характеристик микроволнового излучения были использованы две приёмные антенны в виде открытого конца прямоугольного волновода с поперечным сечением $7,2 \times 3,4$ мм. Антенны были откалиброваны в диапазоне $35 \div 37$ ГГц. Для регистрации мощных микроволновых импульсов был использован детектор на горячих носителях. Основой детектора является кристалл германия р-типа, установленный в середине прямоугольного волновода с поперечным сечением $7,2 \times 3,4$ мм. Детектор был откалиброван с использованием импульсного магнетрона МИ-88Н (рабочая частота 36,65 ГГц, номинальная выходная мощность импульса до 3,6 кВт, длительность сверхвысокочастотного (СВЧ) импульса варьируется в диапазоне $75 \div 200$ нс, частота следования до 6 кГц).

Для измерения спектра микроволнового излучения использовался гетеродинный метод. Гетеродинный приёмник включает в себя встроенный генератор, умножитель частоты на 4, смеситель и аттенюатор с электронным управлением. Устройство было протестировано с генератором импульсов Agilent E8257D и осциллографом Agilent DSO9254A. Основные параметры приёмника: рабочая частота в полосе $35,6 \div 37,0$ ГГц, частота гетеродина 35,44 ГГц, потери на преобразование не более 18 дБ.

Для инжекции электронного пучка использовался взрывоэмиссионный катод с внешним диаметром $D_{\text{cath}} = 18,2$ мм и толщиной кромки 0,3 мм. Катод изготовлен из мелкозернистого (размер зерна около 10 мкм) графита высокой плотности ($1,8 \text{ г/см}^3$), край катода был помещён в максимум магнитного поля первой катушки соленоида. Анодно-катодный зазор составлял около 6 мм. Импульс СВЧ излучения выводился в свободное пространство с помощью рупорной антенны с диаметром окна около 220 мм. Окно излучающего рупора было изготовлено из полиэтилена.

Для получения заданных размеров замедляющей структуры с высокой точностью и улучшения качества её поверхности элементы электродинамической структуры из титанового сплава ВТ-3 изготавливались на станке с компьютерным управлением. Для того, чтобы обеспечить чистоту поверхности по отношению к примесям, в процессе производства не использовались абразивные материалы. После изготовления все элементы были дополнительно очищены в ультразвуковой ванне и помещены в вакуумный объём. Обезгаживание поверхности происходило за счёт осаждения пучка вдоль замедляющей структуры в низких магнитных полях. При максимальном напряжении ускорителя 470 кВ в вакуумном диоде, токе электронного пучка 3,8 кА и ведущем магнитном поле около 2,6 Тл микроволновое излучение, генерируемое на рабочей частоте около 37 ГГц, имело пиковый уровень мощности 750 ± 50 МВт. Полная длительность на полувывоте СВЧ импульса составила 2,8 нс (см. рис. 2а). Значение мощности было получены двумя способами: из калориметрических измерений и с помощью интегрирования плотности потока энергии по

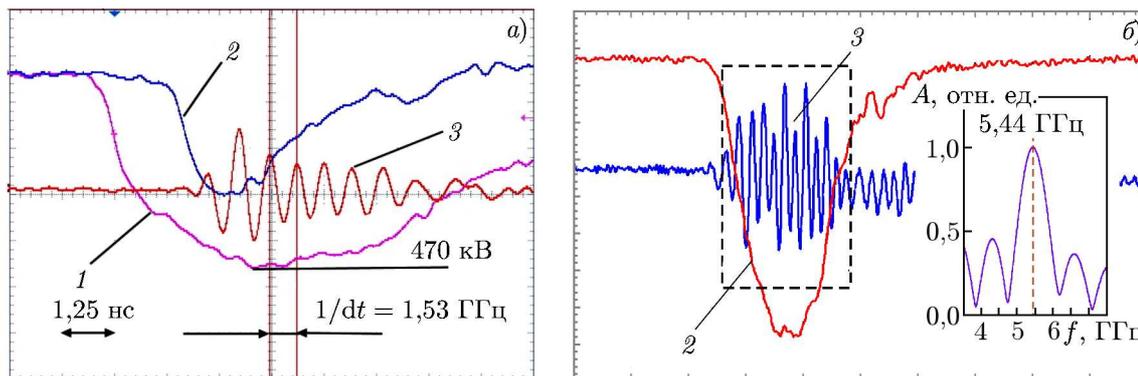


Рис. 2. Осциллограммы сигналов для генератора СВЧ излучения с длиной волны 8 мм (а) и 4 мм (б). Кривая 1 — напряжение в диоде, кривая 2 — огибающая функции детектированного микроволнового импульса, кривая 3 — сигнал промежуточной частоты с гетеродина. Врезка на панели б соответствует спектру сигнала промежуточной частоты

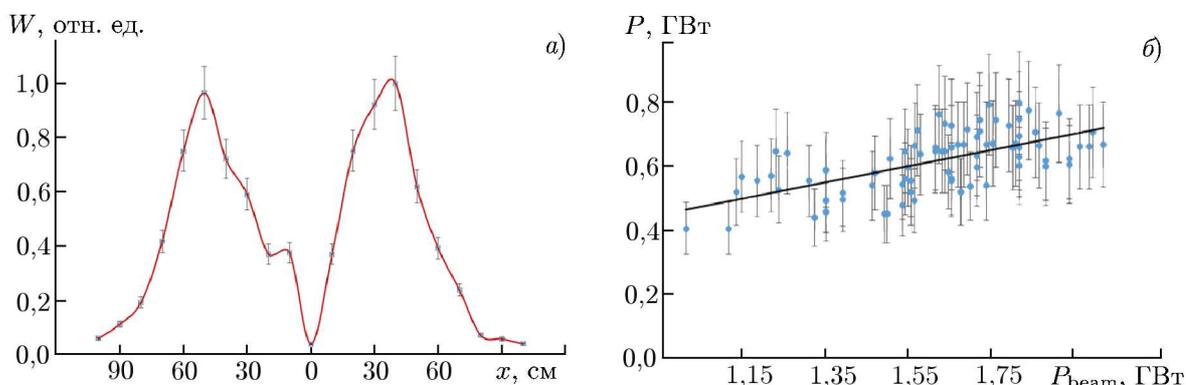


Рис. 3. Диаграмма направленности микроволнового импульса, измеренная на расстоянии 2 м от излучающей антенны (а) и экспериментальные зависимости мощности СВЧ излучения от мощности пучка в диапазоне напряжения на диоде 350–480 кВ (б)

диаграмме направленности (рис. 3а). Таким образом, эффективность преобразования мощности электронного пучка в мощность СВЧ излучения достигала 45 %.

Для измерений микроволновой энергии использовался модифицированный калориметр с более чувствительным, по сравнению с прибором, описанным в [18], модулем регистрации. Коэффициент отражения для поглощающей нагрузки в Ка-диапазоне, полученный в численном моделировании, не превышал -26 дБ.

В ходе эксперимента была получена зависимость мощности микроволнового импульса от мощности электронного пучка (см. рис. 3б). Импульсам микроволнового излучения с максимальной мощностью соответствует область напряжений около 470 кВ.

Во второй серии экспериментов, проводившихся на ускорителе RADAN-303, исследовался генератор с частотой 72,6 ГГц. Импульс напряжения с амплитудой 270 кВ и длительностью около 4,5 нс на полувывоте подавался на диод. В диоде с магнитной изоляцией 3,8 Тл формировался трубчатый электронный пучок с током 2,6 кА. Для улучшения формы огибающей функции импульса напряжения и, в частности, для повышения скорости нарастания переднего фронта импульса до 300 пс применялась нелинейная линия передачи с ферритом NiZn.

Благодаря этим мерам время переходного процесса в генераторе уменьшилось. В результате была достигнута достаточно хорошая стабильность напряжения микроволновых импульсов.

Микроволновая диагностика включала в себя прецизионный калориметр и специально разработанный гетеродин с непрерывным микроволновым сигналом, генерируемым диодом Ганна (рабочая частота $F_h = 77,7$ ГГц). После тщательной юстировки электронного пучка в замедляющей структуре сигналы детектора были достаточно воспроизводимыми с длительностью микроволновых импульсов 1,3 нс (см. рис. 2б). Калориметр показывал микроволновую энергию до 0,11 Дж, что соответствует пиковой мощности до 85 МВт. Эффективность генерации в таком режиме составляла 13 %. Диаграмма распределения плотности потока энергии, полученная на расстоянии 3 м, имела выраженные радиальные максимумы и снижение плотности потока энергии практически до нуля в приосевой области. В целом, диаграмма соответствует симметричной моде или комбинации таких мод.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте была реализована стабильная генерация СВЧ импульсов с длительностью импульса около 3 нс на рабочей частоте 36,4 ГГц и 1,8 нс на частоте 72,6 ГГц. Для замедляющей структуры из титанового сплава мощность СВЧ импульсов для максимального напряжения 470 кВ составила 750 ± 50 МВт. По сравнению с предыдущими результатами для замедляющей структуры из нержавеющей стали длительность микроволнового импульса была увеличена на 20–30 %. Полученная экспериментально эффективность преобразования мощности электронного пучка в мощность СВЧ излучения оценивается величиной до 45 %, что заметно превышает достигнутые ранее уровни для генераторов 8-миллиметрового диапазона длин волн [19]. Экспериментальные результаты и численное моделирование находятся в хорошем согласии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18–42–700012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gold S. H., Nusinovich G. S. // *Rev. Sci. Instrum.* 1997. V. 68, No. 11. P. 3945.
2. Malik H. K., Kumar S., Singh K. P. // *Laser Part. Beams.* 2008. V. 26, No. 2. P. 197.
3. Bratman V. L., Zorin V. G., Kalyanov Y. K., et al // *Phys. Plasmas.* 2011. V. 18, No. 8. Art. no. 083507.
4. Krasik Y. E., Leopold J. G., Shafir G., et al // *Plasma.* 2019. V. 2, No. 1. P. 51.
5. Rostov V. V., Totmeninov E. M., Tsygankov R. V., et al // *IEEE Trans. Elect. Devices.* 2018. V. 65, No. 7. P. 3019.
6. Rostov V. V., Romanchenko I. V., Tsygankov R. V., et al // *Phys. Plasmas.* 2018. V. 25, No. 7. Art. no. 073110.
7. Bugaev S. P., Cherepenin V. A., Kanavets V. I., et al // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1990. V. 18. P. 518.
8. Mesyats G. A., Korovin S. D., Rostov V. V., et al // *Pros. IEEE.* 2004. V. 92. P. 1166.
9. Ростов В. В., Тотменинов Е. М., Яландин М. И. // *Журн. техн. физ.* 2008. Т. 78, № 11. С. 86.
10. Yariv A., Nakamura M. // *IEEE J. Quantum Electron.* 1977. V. QE-13, No. 4. P. 233.
11. Bratman V. L., Denisov G. G., Kol'chugin B. D., et al // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* 1984. V. 5, No. 9. P. 1311.
12. Denisov G. G., Lukovnikov D. A., Samsonov S. V. // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* 1995. V. 16, No. 4. P. 745.
13. Ростов В. В., Тотменинов Е. М. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1993. Т. 36, № 2. С. 192.

14. Тараканов В. П. // В кн. Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003. С. 456.
15. Rostov V. V., Gunin A. V., Tsygankov R. V., et al // IEEE Trans. Plasma Sci. 2018. V. 46, No. 1. P. 33.
16. Rostov V. V., Totmeninov E. M., Tsygankov R. V., et al // IEEE Trans. Electron Dev. 2018. V. 65, No. 7. P. 3 019.
17. Мелихов В. О., Назарова М. В., Солнцев В. А. // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 12. С. 1 481.
18. Выходцев П. В., Ельчанинов А. А., Климов А. И. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 4. С. 71.
19. Ростов В. В., Ельчанинов А. А., Романченко И. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 56, № 8–9. С. 525.

Поступила в редакцию 29 апреля 2019 г.; принята в печать 30 августа 2019 г.

HIGH-EFFICIENCY RELATIVISTIC GENERATORS OF NANOSECOND PULSES IN THE MILLIMETER-WAVELENGTH BAND

*V. V. Rostov, R. V. Tsygankov, A. S. Stepchenko, O. B. Koval'chuk, K. A. Sharypov, S. A. Shunailov,
M. R. Ul'maskulov, and M. I. Yalandin*

We propose and study a scheme of a microwave pulse generator operating in the frequencies range about 37 and 73 GHz, in which the electron interaction with both the (-1) st harmonic of the counter-propagating TM_{02} mode and the synchronous decelerated TM_{01} mode is combined in a sectionalized slow-wave system with an average diameter of 2.5λ . An effective current modulation at the input to the decelerating system is ensured in the region of the cathode–anode gap and the matching section, which reduces diffraction losses of the energy flow directed towards the cathode. Numerical modeling shows that the efficiency of converting the electron beam power to microwave radiation is up to 50%. Experiments demonstrate a stable regime of generation of subgigawatt pulses at an efficiency of more than 40% in the upper part of the millimeter-wavelength band, which have a reproducible spatial wave structure corresponding predominantly to the TM_{01} mode at the input to the emitting horn.