

12

Умеренно релятивистский генератор микроволнового излучения субгигаваттного уровня типа твистрон с эффективностью 50%

© Е.М. Тотьменинов, С.А. Кицанов, А.И. Климов, А.Н. Сияков

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия
E-mail: totm@ife.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 19 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 19 декабря 2018 г.

Принято к публикации 24 декабря 2018 г.

Путем оптимизации электронно-волнового взаимодействия в эксперименте получен режим квазистационарной генерации умеренно релятивистского СВЧ-генератора типа твистрон с эффективностью преобразования мощности электронного пучка в электромагнитное излучение $50 \pm 20\%$. Для параметров электронного пучка (напряжение на диоде 210 кВ, ток пучка 1.36 кА) мощность микроволновой генерации составила 140 ± 40 MW на частоте 10.63 GHz при ведущем магнитном поле около 1.9 Т. Длительность микроволновых импульсов составила около 16 ns.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.06.47501.17648

Наличие в структуре энергообмена предварительной модуляции, которая задает амплитудно-фазовые соотношения между электронным пучком и возбуждаемым электромагнитным полем, расширяет круг режимов работы релятивистских черенковских СВЧ-генераторов. Путем управления этими соотношениями получены плавная перестройка частоты СВЧ-генерации в пределах 10% и длительности СВЧ-сигнала в релятивистской лампе обратной волны с модулирующим рефлектором [1], а также достигнута эффективность около 20% релятивистского черенковского СВЧ-генератора без ведущего магнитного поля [2]. Вместе с тем остается актуальной задача повышения эффективности черенковских приборов, генерирующих мощные СВЧ-импульсы в десятки наносекунд [3]. Ориентиром при этом может служить эффективность 60% и выше, полученная в нерелятивистских приборах [4]. Предпосылки в данном направлении созданы в теоретической работе, посвященной ультрарелятивистскому твистрону-усилителю [5]. В ней показано, что эффективность такого прибора, в котором область энергоотбора отделена от области модуляции пучка участком инерционной группировки, достигает $\approx 60\%$. Данный подход нашел подтверждение в численном эксперименте [6] для относительно небольшой энергии электронов (около 200 keV) с использованием PIC-кода KARAT [7]. Было показано, что на основе модернизированной схемы релятивистской лампы обратной волны с модулирующим рефлектором при соответствующем подборе амплитудно-фазовых соотношений реализуется структура энергообмена, близкая к описанной в [5]. Эффективность преобразования мощности электронного пучка в электромагнитное излучение в таком твистроне-генераторе составила 55%.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании рассчитанного в [6] твистрона-генератора для частотного диапазона 10.0 GHz.

Генератор с магнитной системой и электронным пучком схематично представлен на рис. 1. Место высадки электронного пучка (точка А) выбрано вблизи области максимальной компактности электронного сгустка, чтобы не допустить его разрушения под действием сил объемного заряда. Амплитудно-фазовые соотношения в генераторе таковы, что электронный сгусток, предварительно сформированный в результате модуляции электронов по скорости в области резонансного рефлектора, вблизи места высадки оказывается в тормозящей фазе высокочастотного (ВЧ) поля. Поле представлено синфазной суммой двух основных гармоник (0)-й попутной и (-1)-й встречной волны, у которых сопротивления

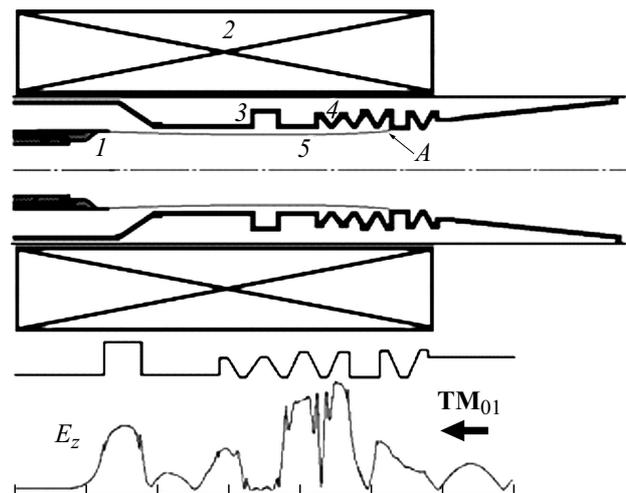


Рис. 1. Схема твистрона-генератора: 1 — кромочный взрывоэмиссионный катод и катододержатель, 2 — импульсный соленоид, 3 — модулирующий рефлектор, 4 — замедляющая система, 5 — электронный пучок, А — место высадки электронного пучка. Внизу представлено „холодное“ продольное распределение компоненты E_z электрического поля на радиусе пучка для частоты 10.63 GHz.

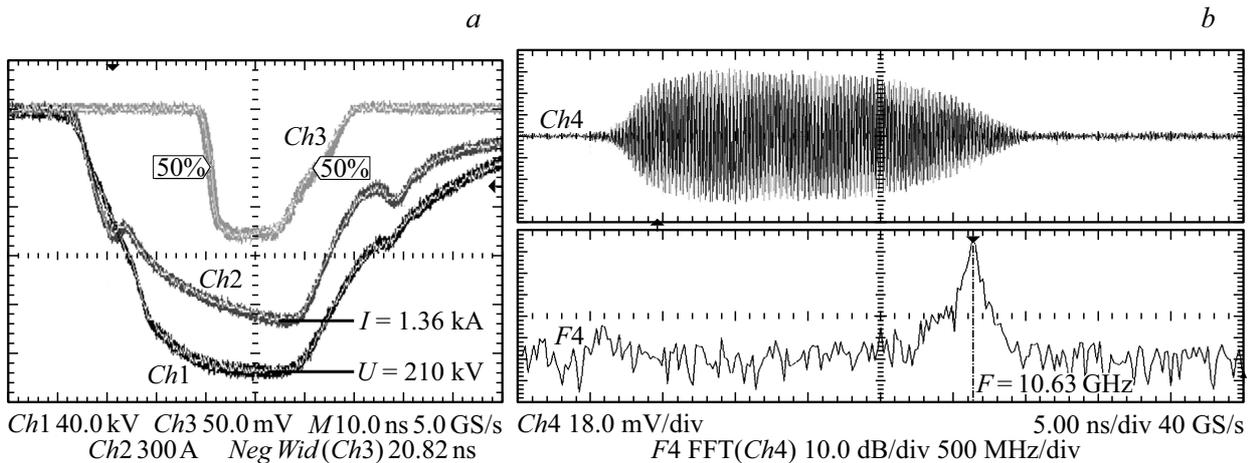


Рис. 2. Пакет из 20 последовательных импульсов напряжения на диоде (*Ch1*), тока диода (*Ch2*), детектированных СВЧ-сигналов (*Ch3*) (а) и осциллограмма радиосигнала (*Ch4*) и его спектр (*F4*) (б). $F = 10.63$ GHz.

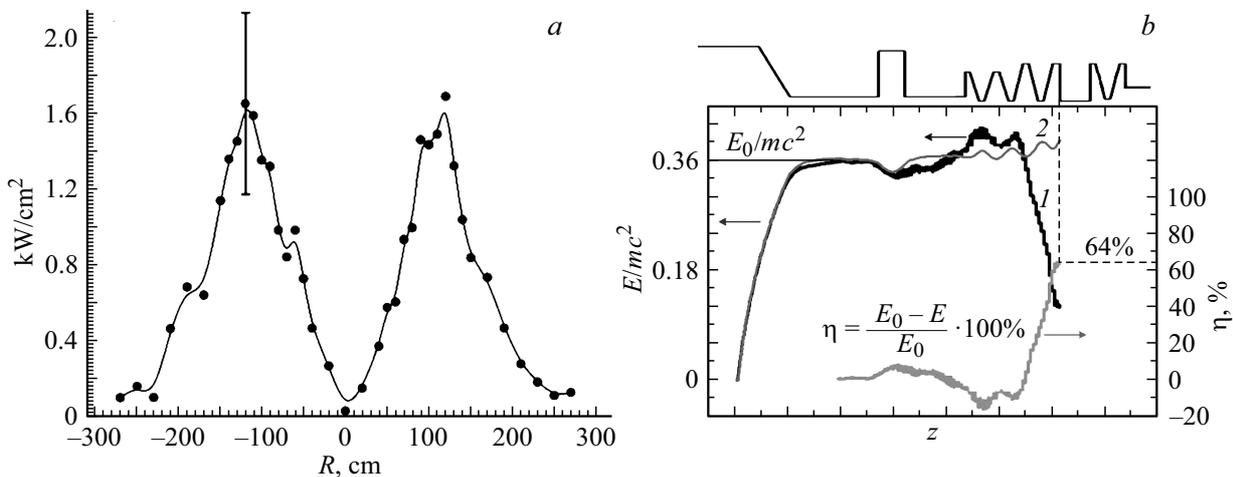


Рис. 3. Пространственное распределение плотности потока мощности, измеренное на расстоянии 600 см от апертуры излучающей антенны (а), и результат численного моделирования [5] для режима с эффективностью 55% (б): E/mc^2 — усредненная за период ВЧ-колебаний нормированная кинетическая энергия электронов (1 — в режиме квазистационарной СВЧ-генерации, 2 — в отсутствие генерации) и „электронный КПД“ генератора (η).

связи с пучком составляют $Z_0 \approx 3.3 \Omega$, $Z_{-1} \approx 2.5 \Omega$ соответственно [6]. Таким образом, эффективный энергоотбор осуществляется на достаточно коротком участке замедляющей системы с длиной, равной периоду гофры (рис. 1). Отработанный электронный пучок сразу же высаживается на поверхность электродинамической структуры. Следствие этого — малое количество обратных электронов, вклад которых в структуру энергообмена в общем случае является неконтролируемым.

Эксперимент был выполнен с использованием сильноточного ускорителя электронов „СИНУС-7“ [8], длительность импульса напряжения которого составляла около 50 ns при длительности фронта около 20 ns. Для вывода излучения в открытое пространство использовался конический рупор с диаметром излучающей апертуры 350 mm. СВЧ-сигнал принимался антенной в виде открытого конца прямоугольного волновода сечением

23×10 mm с поглотителями на внешней части для уменьшения зависимости эффективной площади антенны от частоты. Погрешность измерения эффективной площади составляла $\pm 20\%$. Сигнал передавался в экранированное помещение с помощью кабеля РК50-4-47, детектировался полупроводниковым детектором и регистрировался осциллографом Tektronix TDS-7404. Погрешность калибровки передающей трассы составляла $\pm 7\%$, а детектора — $\pm 20\%$. При измерении спектра генерации радиосигнал регистрировался осциллографом LeCroy WaveMaster 830Zi. Ведущее магнитное поле создавалось импульсным соленоидом с длиной намотки около 260 mm и индукцией 1.9 T.

Для параметров электронного пучка, близких к расчетным: напряжение на диоде 210 ± 20 kV, ток пучка генератора 1.36 ± 0.07 kA, были получены импульсы СВЧ-излучения на частоте 10.63 GHz (рис. 2). Длитель-

ность излучения по уровню 0.5 от максимальной мощности составила ≈ 16 ns. В пределах пачки (рис. 3, *a*) стандартное отклонение СВЧ-мощности не превышало $\pm 5\%$. Мощность СВЧ-излучения, полученная путем интегрирования пространственного распределения плотности потока мощности (рис. 3, *a*, рабочий тип волны TM_{01}), составила 140 ± 40 MW. Это соответствует эффективности преобразования мощности электронного пучка (произведение напряжения на диоде и тока пучка) в электромагнитное излучение $50 \pm 20\%$. На основе проведенного ранее численного моделирования [6] можно сделать оценку „электронного“ КПД генератора (η), рассчитанного по изменению кинетической энергии электронов пучка относительно их начальной энергии в канале перед рефлектором. Для эффективности 50% значение η можно оценить величиной около 60% (рис. 3, *b*), т. е. в процессе взаимодействия электроны пучка теряют в среднем более половины своей начальной энергии.

Отметим, что расположение места высадки электронного пучка в области максимума напряженности электрического поля может стимулировать процессы, приводящие к ухудшению условий генерации [9]. Однако формы СВЧ-сигналов и близкая к расчетной эффективность генератора свидетельствуют о том, что в условиях эксперимента эти факторы не проявлялись.

Проведенное экспериментальное исследование показывает, что на базе твистрона-генератора и компактного сильноточного электронного ускорителя возможно создание высокоэффективных источников микроволнового излучения с мощностью $\sim 10^8$ W, предназначенных для лабораторных исследований, а возможно, и для решения различных прикладных задач. Для работы таких СВЧ-источников важно, что существенное уменьшение энергии частиц в отработавшем электронном пучке снижает уровень тормозного рентгеновского излучения и соответственно требования к радиационной защите обслуживающего персонала.

Авторы выражают благодарность С.Е. Острижных за помощь в проведении эксперимента, а также региональному центру коллективного пользования Томского научного центра СО РАН за возможность использования осциллографа LeCroy WaveMaster 830Zi.

Список литературы

- [1] Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В., Тотменинов Е.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. В. 12. С. 1189–1196.
- [2] Totmeninov E.M., Kitsanov S.A., Vykhodtsev P.V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. V. 39. N 4. Pt 2. P. 1150–1153.
- [3] Yang D., Shi Y., Xiao R., Teng Y., Sun J., Chen C. // AIP Adv. 2018. V. 8. P. 095229.
- [4] Teryaev V.E., Shchelkunov S.V., Jiang Y., Hirshfield J.L. // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1812. P. 060004.
- [5] Ковалёв Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д., Сморгонский А.В. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 76–113.
- [6] Тотменинов Е.М. // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 8. С. 61–64.
- [7] Тараканов В.П. // Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003. С. 456–476.
- [8] Mesyats G.A., Korovin S.D., Gunin A.V., Gubanov V.P., Stepchenko A.S., Grishin D.M., Landl V.F., Alekseenko P.I. // Laser Part. Beams. 2003. N 21. P. 197–209.
- [9] Korovin S.D., Mesyats G.A., Pegel I.V., Polevin S.D., Tarakanov V.P. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28. N 3. P. 485–495.