

11;13

Генерация импульсов СВЧ излучения с несущей частотой 3.8 GHz и длительностью 75 ns релятивистским черенковским СВЧ генератором без ведущего магнитного поля

© Е.М. Тотменинов,¹ А.С. Степченко,¹ В.В. Ростов,¹ А.И. Климов²

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: totm@lfe.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 28 марта 2017 г. В окончательной редакции 17 октября 2017 г.)

В эксперименте для энергии электронов ≈ 500 keV получен режим длинноимпульсной ($\sim 300 T$, где T — период колебаний) генерации релятивистского черенковского СВЧ генератора без ведущего магнитного поля на несущей частоте 3.8 GHz. Длительность импульса мощного СВЧ излучения составила ~ 75 ns, пиковая мощность генерации 210 ± 30 MW, а эффективность конверсии мощности $9 \pm 1\%$.

DOI: 10.21883/JTF.2018.04.45730.2272

Одна из возможных областей применения мощного СВЧ излучения, которая имеет специализированный характер, может быть связана с тестированием работоспособности или выводом из строя интегральных микросхем (ИМС) в электронных устройствах. Например, в работах [1,2] было показано, что для коротких СВЧ импульсов длительностью $\tau = 20\text{--}30$ ns и длиной волны излучения $\lambda = 10$ cm наиболее уязвимым микроструктурным элементом ИМС является металлизация (многоуровневая система контактных дорожек на поверхности кристалла). В результате анализа образцов ИМС, подвергнутых СВЧ воздействию, было найдено [1,2], что при напряженности электрического поля $E = 0.1\text{--}4$ kV/cm плавление металлизации чаще всего наблюдалось в области контактных площадок и поворотов токоведущих линий. В другой работе [3] по данной тематике было показано, что на стойкость интегральных микросхем существенно влияют такие параметры радиоизлучения, как несущая частота, длительность, частота повторения импульсов и ориентация относительно электромагнитных полей. Причем интенсивность СВЧ излучения $I = E^2/2W_0$ ($W_0 = 120\pi$ [Ω]), приводящего к повреждению ИМС, радикально снижается как при увеличении частоты повторения, так и длительности СВЧ импульсов [3]. Принимая во внимание данные результаты, представляется актуальным провести исследование возможности увеличения длительности СВЧ излучения релятивистского генератора S-диапазона (2–4 GHz).

Устройство для получения мощных микроволновых импульсов обычно представляет собой комбинацию из нескольких элементов: высоковольтный модулятор, СВЧ генератор с магнитной и излучающей системами и соответствующие источники питания. Для практических применений, когда наиболее востребованным является импульсно-периодический режим работы СВЧ генерато-

ра, такое устройство как целое должно иметь малый вес, габариты и энергоемкость. Среди всех вариантов мощных релятивистских СВЧ генераторов можно выделить приборы без ведущего магнитного поля, например виркатор [4] и черенковский СВЧ генератор без ведущего магнитного поля [5], которые обеспечивают генерацию СВЧ излучения гигаваттного уровня в S-диапазоне без использования магнитных систем для транспортировки электронного пучка. Отсутствие ведущего магнитного поля приводит к тому, что исключаются не только существенные затраты энергии на создание квазипостоянного магнитного поля, но и сложные дополнительные системы (криогенная или масляная) для охлаждения катушек соленоида.

Наименее устойчивыми к воздействию релятивистского сильноточного (несколько килоампер) электронного пучка являются анодные сетки, которые также входят в состав электродинамических систем данных СВЧ генераторов. Актуальность данной проблемы возрастает при переходе к импульсно-периодическим и длинноимпульсным (~ 100 ns и более) режимам работы генераторов, когда резко возрастает тепловая нагрузка. Например, в импульсно-периодическом режиме работы двухсекционного виркатора ресурс межсекционной вольфрамовой сетки составляет в лучшем случае несколько десятков импульсов [4]. В данном приборе фокусировка электронного пучка (пинчевание) и соответственно возрастание плотности тока до нескольких kA/cm² происходит вблизи поверхности межсекционной сетки, что приводит к ее разогреву и последующему термическому разрушению. В отличие от виркатора в релятивистском черенковском СВЧ генераторе без ведущего магнитного поля пинчевание электронного пучка отсутствует или эта область удалена на значительное расстояние от поверхности анодной сетки (рис. 1). Повышенный ресурс анодной сетки, изготовленной из стальной нержавеющей

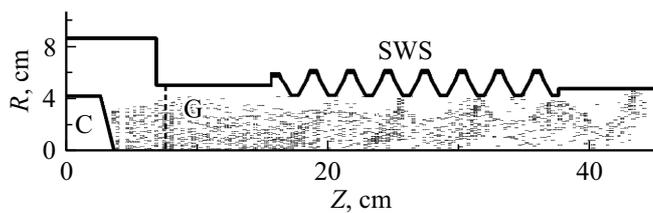


Рис. 1. Результат моделирования (расчет PIC-кодом KARAT [9]) транспортировки электронного пучка вдоль пространства взаимодействия релятивистского черенковского СВЧ генератора без ведущего магнитного поля в режиме стационарной генерации: SWS — замедляющая система, С — катод, G — анодная сетка.

проволоки, был ранее продемонстрирован в экспериментах для импульсно-периодических режимов работы (сетка выдерживала воздействие электронного пучка с энергией ≈ 100 J/pulse в четырехсекундной пачке с частотой повторения 10 Hz при общей наработке более 10 000 импульсов [5]).

В черенковском СВЧ генераторе без ведущего магнитного поля взаимодействие происходит между основной гармоникой синхронной электромагнитной волны, замедленной до скорости света, для которой амплитуда продольной компоненты электрического поля не зависит от радиуса [6], и сплошным цилиндрическим электронным пучком (рис. 1). Таким образом, можно полагать, что при длительностях импульса тока пучка ~ 100 ns эффект поперечного расширения катодной плазмы со скоростью $\sim 2 \cdot 10^6$ cm/s [7] не будет оказывать существенного влияния на эффективность и мощность генерации. Например, в СВЧ генераторах с ведущим магнитным полем и трубчатыми пучками радиальное расширение внешней границы пучка приводит к постепенному возрастанию потерь тока при транспортировке потока частиц вдоль пространства взаимодействия вследствие осаждения электронов на поверхность ЗС, а также изменению самих условий взаимодействия между электронным пучком и электромагнитной волной [8]. Настоящую работу можно рассматривать как продолжение экспериментальных исследований релятивистского черенковского СВЧ генератора без ведущего магнитного поля с переходом к повышенным длительностям тока пучка и его энергетики.

Эксперимент был выполнен на сильноточном ускорителе электронов „СИНУС-500-106“. Длительность импульса напряжения составляла 107 ns и достигалась за счет использования в конструкции ускорителя комбинированной формирующей линии, состоящей из коаксиального и спирального участков [10]. Длительность фронта импульса напряжения составляла около 7 ns. Амплитуды напряжения на диоде и тока вакуумного диода составляли около 500 kV и 4.7 kA и соответствовали настройкам генератора из работы [5] для значений энергий электронов около 500 keV. Конструкция экспериментального макета СВЧ генератора представлена на

рис. 2. Взрывная эмиссия электронов осуществлялась с поверхности бархатного катода. Катод представлял собой латунную подложку, поверх которой натягивалась бархатная ткань. Профиль (рис. 1) и материал катода выбирались такими, чтобы обеспечить максимальную длину транспортировки пучка вдоль пространства взаимодействия при отсутствии ведущего магнитного поля. Данный выбор эмитирующего материала обусловлен рядом ранних экспериментов с генератором данного типа [5], где было обнаружено, что использование бархатной ткани способствует получению наиболее близких к расчетным значениям мощности и эффективности генерации. При тестировании различных катодных материалов (графит, металл-диэлектрик, бархат) с однотипным профилем эмиссионной поверхности было обнаружено, что за счет более однородной эмиссии бархатный катод обеспечивает наибольшую длину транспортировки электронного пучка. Анодная сетка была изготовлена из вольфрамовой (удельная теплота плавления ≈ 200 kJ/kg)

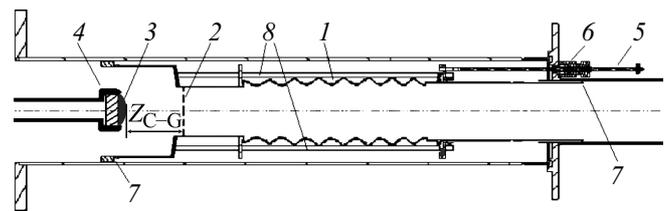


Рис. 2. Конструкция генератора: 1 — замедляющая система, 2 — анодная сетка, 3 — бархатный катод на металлической подложке, 4 — охранный электрод, 5 — шток для изменения длины зазора анод-катод Z_{C-G} без развакуумирования системы (необходим для настройки генератора), 6 — вакуумное уплотнение, 7 — плунжера, 8 — стягивающие шпильки.

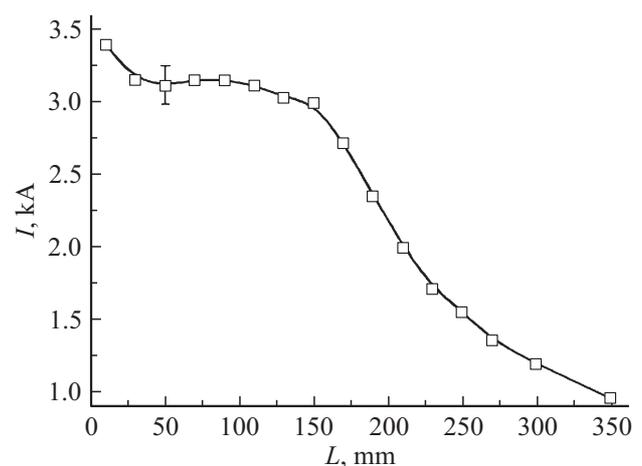


Рис. 3. Зависимость прошедшего за анодную сетку тока пучка I от расстояния L между анодной сеткой и токовым коллектором, расположенным в трубе дрейфа диаметром 100 mm, для катода на основе бархатной ткани: зазор анод-катод $Z_{A-C} = 25$ mm, напряжение в диоде — 500 kV, ток вакуумного диода — 4.7 kA. Относительная погрешность измерения тока электронного пучка $\pm 6\%$.

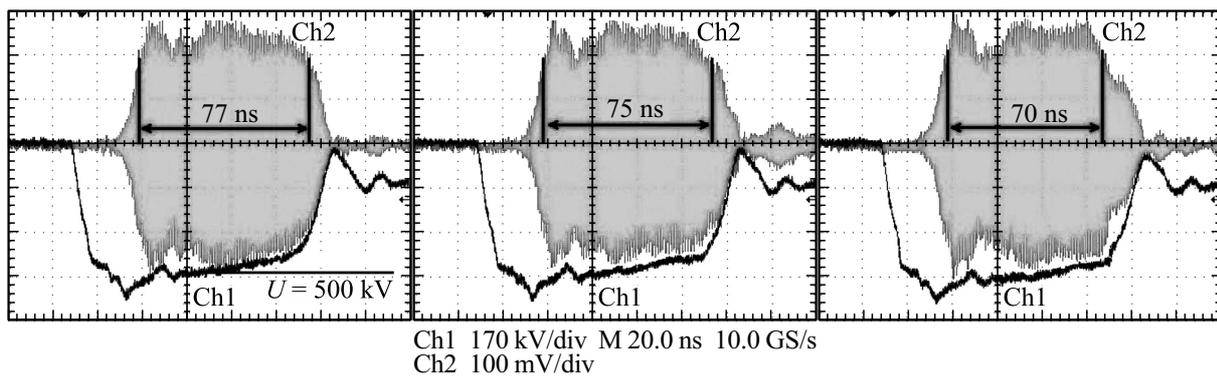


Рис. 4. Типичные формы импульсов напряжения в вакуумном диоде (Ch1) и радиосигналов (Ch2).

проволоки диаметром 0.2 mm, которая обладает более высокой термической стойкостью по сравнению со стальной. Диаметр области эмиссии составлял 70 mm, внешний диаметр анодной сетки 100 mm, размер ячейки анодной сетки 4 × 4 mm, зазор анод-катод $Z_{C-G} \approx 25$ mm. Необходимо отметить, что ток за анодной сеткой (рабочий ток) приблизительно на 30% меньше полного тока вакуумного диода (рис. 3). Главным образом, данные потери связаны с паразитными взрывоэмиссионными токами с поверхности охранного электрода (рис. 2), который был изготовлен из нержавеющей стали. Таким образом, плотность тока электронного пучка, эмитированного с поверхности бархатного катода, можно оценить величиной ≈ 100 A/cm² и величиной ≈ 70 A/cm² на поверхности анодной сетки (диаметр отпечатка пучка на дисковой мишени из винипрозовой пленки, помещенной на анодной сетке, составлял около 80 mm). СВЧ сигнал принимался антенной в виде короткого электрического вибратора [11], передавался в экранированное помещение с помощью кабеля с тефлоновым заполнением РК50-4-47 и регистрировался осциллографом Tektronix TDS-6604 с рабочей полосой 6 GHz. Для измерений спектра генерируемых импульсов применялся встроенный в осциллограф аппарат быстрого преобразования Фурье. Эффективное сечение антенны составляло 0.1 cm², а его погрешность измерения $\pm 13\%$. Излучение выводилось в открытое пространство с помощью рупорной антенны с диаметром излучающей апертуры 450 mm. С целью минимизации отражений волн от стен рабочего помещения использовались радиопоглощающие покрытия.

В эксперименте для указанных выше параметров электронного пучка были получены импульсы СВЧ излучения с длительностью $\tau \approx 75$ ns по уровню 0.7 от пикового значения их амплитуд (рис. 4, 5), что составляет $\approx 300 T$, где T — период колебаний. Нестабильность пиковых амплитуд СВЧ сигналов составляла $\pm 7\%$. Пиковая мощность излучения, полученная путем интегрирования плотности потока мощности излучения (рис. 6), составила 210 ± 30 MW. Это соответствует пиковой эффективности преобразования мощно-

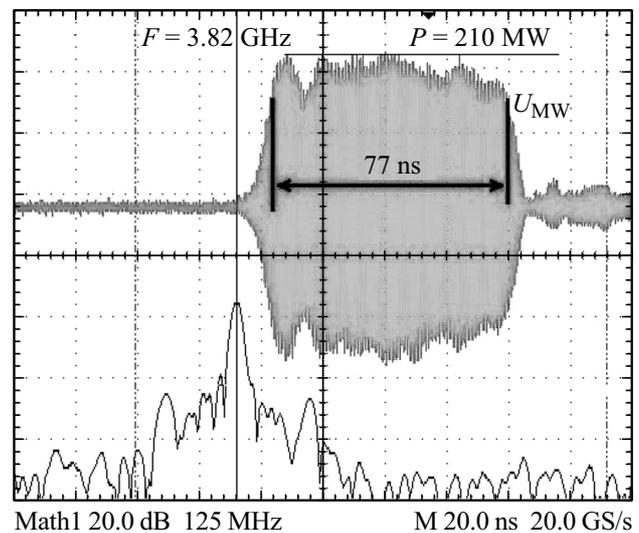


Рис. 5. Радиосигнал (U_{MW}) и его спектр (центральная частота 3.82 GHz). Максимальному значению амплитуды радиосигнала соответствует уровень СВЧ мощности 210 MW.

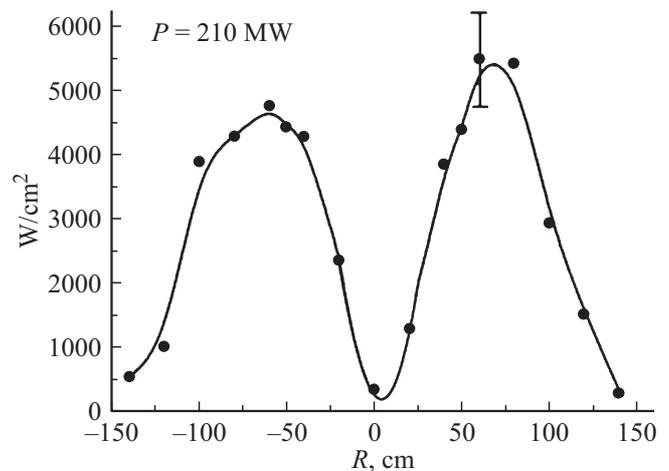


Рис. 6. Распределение плотности потока пиковой мощности излучения, измеренное на расстоянии 6 м от окна излучающего рупора (в каждой точке проводилось усреднение по 5 импульсам). Относительная погрешность измерения мощности СВЧ излучения $\pm 14\%$.

сти электронного пучка в электромагнитное излучение $9 \pm 2\%$. За вычетом потерь тока в области вакуумного диода, эффективность может быть оценена величиной $13 \pm 3\%$. Формы радиосигналов свидетельствуют о том, что условия взаимодействия между электронным пучком и электромагнитной волной сохраняются в течение большей части импульса тока. Окончание СВЧ генерации обусловлено срезом импульса напряжения и тока пучка.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты позволяют предположить, что существует возможность для дальнейшего повышения длительности СВЧ излучения релятивистского черенковского СВЧ генератора без ведущего магнитного поля. Также можно предположить, что невысокий разброс формы СВЧ сигнала от импульса к импульсу и стабильность генерации внутри каждого импульса, по-видимому, связаны с формированием сплошного цилиндрического электронного пучка в условиях, когда поперечный разлет катодной плазмы на поверхности катода делает область эмиссии более равномерной. В конечном итоге это должно приводить к уменьшению разброса по энергиям электронов и повышению однородности электронного пучка по его поперечному сечению.

Оценки показывают, что замена стальной проволоки на вольфрамовую приблизительно в 2.5 раза увеличивает термическую стойкость анодной сетки. Таким образом, при длительностях тока пучка ~ 100 ns вполне реализуемы пачечные импульсно-периодические режимы работы данного генератора с общим числом импульсов в единичной пачке до нескольких десятков и последующей паузой.

Список литературы

- [1] Магда И.И., Блудов С.Б., Гадецкий Н.П., Кравцов К.А., Пушкарев С.С., Ткач Ю.В., Чумаков В.И., Лобков М.М. // Петербург. журн. электроники. 1995. № 3. С. 56–59.
- [2] Старостенко В.В., Таран Е.П., Григорьев Е.В., Борисов А.А. // Измерительная техника. 1998, № 4. С. 65–67.
- [3] Пирогов Ю.А., Солодов В.А. // Журн. радиоэлектроники. 2013. № 6. С. 1–38.
- [4] Кицанов С.А., Климов А.И., Коровин С.Д., Куркан И.К., Пегель И.В., Полевин С.Д. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 5. С. 82–90.
- [5] Totmeninov E.M., Kitsanov S.A., Vykhodtsev P.V. // IEEE Trans. Plasma. Sci. 2011. Vol. 39. N 4. Part 2. P. 1150–1153.
- [6] Тотьменинов Е.М., Климов А.И. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 6. С. 153–155.
- [7] Бугаев С.П., Ильин В.И., Кошелев В.И., Месяц Г.А., Нечаев В.Е., Усов Ю.П., Фукс М.И., Яблоков Б.Н. Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 5–75.
- [8] Тотьменинов Е.М., Выходцев П.В., Гунин А.В., Климов А.И., Ростов В.В. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 3. С. 120–125.
- [9] Тараканов В.П. // Математическое моделирование. Проблемы и результаты. 2003. М.: Наука. С. 456–476.
- [10] Totmeninov E.M., Gunin A.V., Klimov A.I., Rostov V.V., Stepchenko A.S., Vykhodtsev P.V., Mahir A.H. // IEEE Trans. Plasma. Sci. 2012. Vol. 40. N 6. Part 1. P. 1590–1593.
- [11] Klimov A.I., Konev V.Yu. // Proc. of the 15th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia, 2008. P. 434–436.