

## О повышении энергетической эффективности импульсно-периодической релятивистской лампы обратной волны с модулирующим резонансным рефлектором

© Е.М. Тотьменинов, П.В. Выходцев, А.В. Гунин, А.И. Климов, В.В. Ростов

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: totm@lfe.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 16 апреля 2013 г.)

В результате оптимизации электронно-волновой системы и применения декомпрессии продольного магнитного поля, характеризуемой максимальной индукцией (0.62 Т) в области взрывоэмиссионного катода и пониженным полем (0.36 Т) по отношению к циклотронному резонансу в замедляющей системе, разработан эффективный СВЧ-генератор (320 MW, 7.9 GHz) микроволновых импульсов длительностью до 90 ns. В пакетном (до 10 s) импульсно-периодическом режиме (100 Hz) максимальная эффективность преобразования мощности электронного пучка в микроволновое излучение составляла 27%. Средняя энергия в импульсе излучения достигала 23 J и соответствовала приблизительно 18% от энергии импульса высоковольтного генератора.

### Введение

Первый эксперимент по генерации экстремально мощного на тот момент СВЧ-излучения в диапазоне длин волн 3 см (300 MW при эффективности преобразования мощности электронного пучка в микроволновое излучение около 10%) был выполнен 40 лет назад с помощью сильноточного электронного пучка на основе релятивистской лампы обратной волны (РЛОВ) [1]. Выбор данного типа генератора был обусловлен его высокой адаптивностью к изменяющемуся в течение импульса ускоряющему напряжению сильноточного ускорителя прямого действия. Позднее на основе более мощных ускорителей и с применением неоднородных замедляющих систем (ЗС) удалось повысить импульсную мощность генерации до 3 GW [2] и увеличить эффективность преобразования мощности электронного пучка в микроволновое излучение до 40% [3]. Однако в силу большой длительности переходного процесса 10–20 ns и нарушения электрической прочности ЗС под воздействием интенсивных СВЧ-полей (так называемый „pulse shortening“ эффект [2,4–6]) энергетический КПД генераторов оказывался в несколько раз ниже. Максимальная энергия в микроволновом импульсе составляла около 20 J [2]. Обработка поверхности ЗС низкоэнергетичным электронным пучком с целью повышения ее электрической прочности привела к увеличению энергии в СВЧ-импульсе до 90 J при энергетическом КПД генератора около 13% [7]. Другой подход, связанный с использованием альтернативной схемы генератора с селективным трансформатором мод, обеспечил увеличение длительности микроволнового излучения до 100 ns при уровне выходной мощности 700 MW [8]. Указанный выше уровень достигнутых энергий и длительностей в микроволновых импульсах был характерен для крупных

установок с запасаемой энергией в высоковольтных формирующих линиях порядка и более 1 kJ и массой ускорителей  $\approx 10$  t. По сути дела все эти эксперименты носили характер фундаментальных исследований, в частности, для выяснения предельных возможностей релятивистских СВЧ-генераторов и особенностей работы приборов с сильноточным электронным пучком. Их практическое предназначение только осмысливалось и связывалось с задачами смежных исследований. Расширить спектр приложений (для плазмохимии, локации и др.) можно было бы с переходом от однократных импульсов, когда, как правило, использовались энергоемкие источники для создания сильных импульсных магнитных полей, к импульсно-периодическому режиму. Очевидно также, что более востребованы могут быть импульсно-периодические микроволновые источники среднего класса и габаритов, с запасаемой энергией  $\sim 100$  J и массой  $\sim 1$  t и менее.

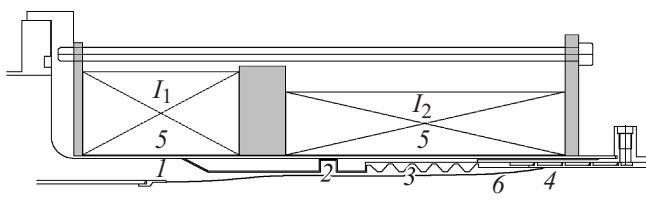
К числу одной из первых импульсно-периодических установок среднего класса следует отнести РЛОВ 10 GHz диапазона в составе мобильного комплекса для экспериментов по наносекундной локации [9], где ведущее магнитное поле 3 Т создавалось криомагнитной системой. Позже была разработана конструкция генератора с резонансным рефлектором (РЛОВ-РР) [10,11]. В этой схеме благодаря предварительной модуляции электронов в области рефлектора удается сохранить селективные свойства по отношению к рабочему типу волны  $TM_{01}$  в круглом гофрированном волноводе с увеличенным (в масштабе длины волны) в 1.3–1.5 раз средним диаметром. В результате оказалось возможным существенно снизить значения рабочего магнитного поля до 0.5–0.7 Т (ниже циклотронного „провала“ с центром  $\approx 1$  Т) и получить относительно высокую эффективность преобразования мощности электронного

пучка в микроволновое излучение  $\approx 24\%$  [10]. На основе РЛОВ-РР был создан экспериментальный макет источника микроволнового излучения 10 GHz диапазона в пониженном магнитном поле 0.5 Т с импульсной мощностью 500 MW и длительностью 12 ns (энергия в импульсе 6 J), который работал в непрерывном режиме с частотой повторения до 100 Hz [12]. При проверке предельных возможностей данной схемы в условиях сильных магнитных полей (4 Т) мощность генерации и энергия излучения были повышены до 5 GW и 80 J соответственно [12] без применения специальных методов обработки поверхности электродинамической структуры. Максимальная эффективность преобразования мощности электронного пучка в микроволновое излучение достигала  $\approx 40\%$  [13].

В настоящей работе решалась задача на основе модифицированного ускорителя среднего класса „СИНУС-500-106“ повысить длительность генерируемых СВЧ-импульсов (до  $\sim 100$  ns), которая на наш взгляд близка к предельной для диапазона 10 GHz. Такой предел уже следует связывать с разлетом катодной плазмы поперек ( $\sim 2 \cdot 10^6$  cm/s) и вдоль ( $\sim 10^7$  cm/s) силовых линий магнитного поля [14]. Одно из следствий этого явления — поперечное расширение пучка — затрудняет поддержание оптимальных условий взаимодействия электронов с полем встречной волны в течение всего импульса, а начиная с некоторого момента времени и транспортировки пучка вдоль ЗС. В моделировании и эксперименте важно было также учесть снижение во времени импеданса коаксиального диода с магнитной изоляцией.

## Численное моделирование

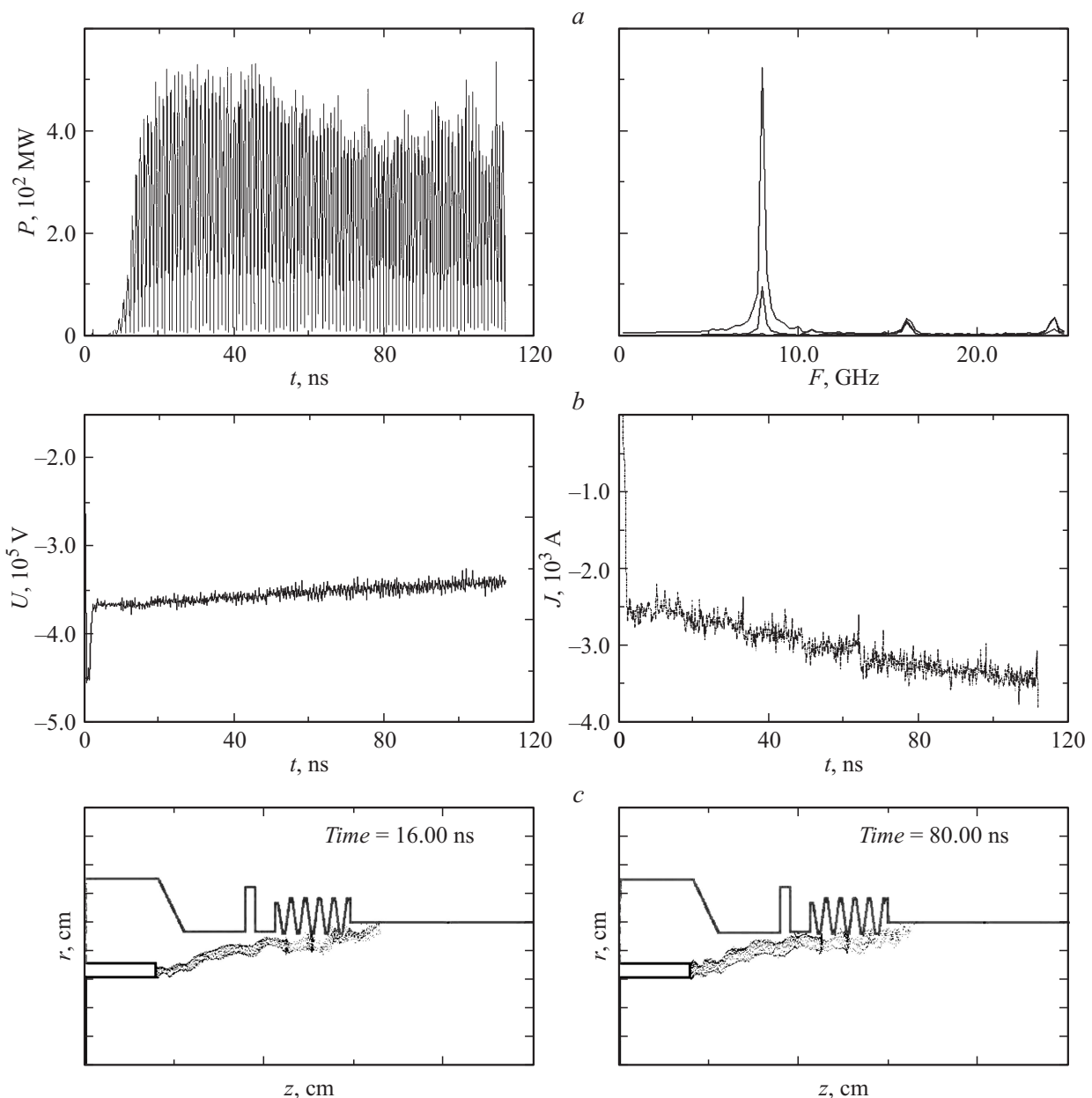
Общий вид конструкции генератора с магнитной системой представлен на рис. 1. В данной конструкции генератора отражение падающей рабочей волны  $TM_{01}$  от резонансного рефлектора происходит в режиме холостого хода вследствие возбуждения в нем запертой симметричной моды  $TM_{02}$  [11]. При этом амплитуда поля продольной компоненты электрического поля на радиусе пучка в области рефлектора может в несколько



**Рис. 1.** Конструкция СВЧ-генератора: 1 — взрывоэмиссионный катод, 2 — резонансный рефлектор, 3 — ЗС, 4 — коллектор с водяным охлаждением, 5 — двухсекционный соленоид с воздушным охлаждением, 6 — траектория электронного пучка.

раз превышать амплитуду бегущей волны в волноводе, что создает условия для эффективной предварительной модуляции электронного потока по энергии в ограниченной области пространства. Двухсекционный соленоид [12], который обеспечивает режим декомпрессии электронного пучка, необходим для увеличения магнитного поля на катоде, что способствует росту числа эмиссионных центров [14] и соответственно более равномерной эмиссии электронов, а также уменьшению поперечных скоростей электронов.

Для проведения численного оптимизационного эксперимента с целью разработки экспериментального макета генератора были использованы PIC-код KARAT [15] (версия кода с дополнительной возможностью, учитывающей радиальное расширение области эмиссии электронов) и программа для расчета электродинамических характеристик на основе метода матриц рассеяния [16]. Оптимизация проводилась как по параметрам электронного пучка и электродинамической системы генератора (состоит из ЗС, резонансного рефлектора и коллектора), так и конфигурации силовой линии магнитного поля. В последнем случае за счет изменения соотношения токов в секциях соленоида происходило варьирование степени декомпрессии электронного пучка (менялся радиальный зазор между пучком и внутренней поверхностью ЗС). В конечном итоге это приводило к изменению условий энергообмена (менялась связь между пучком и электромагнитной волной) и условий транспортировки электронного потока вдоль пространства взаимодействия. Для улучшения селективных свойств электродинамической системы применялось профилирование гофрировки ЗС по амплитуде и периоду. В процессе расчетов были определены оптимальные параметры электронного пучка: энергия электронов — 350 keV, ток — 3.0 kA. Средний диаметр ЗС в 1.3 раза превышал длину волны излучения. Итоговая конфигурация магнитного поля двухсекционного соленоида была такова, что в месте расположения катода поле было в 1.7 раза больше, чем в области расположения рефлектора и ЗС (при токах в магнитных катушках  $I_1 = I_2 = 67$  A максимальная индукция поля в катодной секции составляла  $B_{\text{cathode}} = 0.62$  Т, в области рефлектора и ЗС —  $B_{\text{SWS}} = 0.36$  Т). В оптимальном режиме расчетная эффективность генератора составила 32% при микроволновой мощности 310 MW на частоте  $\approx 7.8$  GHz (рис. 2, a), которая соответствует рабочей волне  $TM_{01}$ . По мере радиального расширения катодной плазмы происходило снижение импеданса диода (рис. 2, b) и ухудшение условий транспортировки (рис. 2, c). Как следствие, это приводило к постепенному снижению мощности и эффективности генерации. Оценка максимальной напряженности ВЧ-электрического поля на поверхности гофрировки проводилась с помощью программы на основе метода матриц рассеяния. Для расчетной мощности генерации 300 MW данное значение составляет около 500 kV/cm, что ниже характерных уровней  $\approx 1$  MV/cm для возникновения эффекта „pulse shortening“.

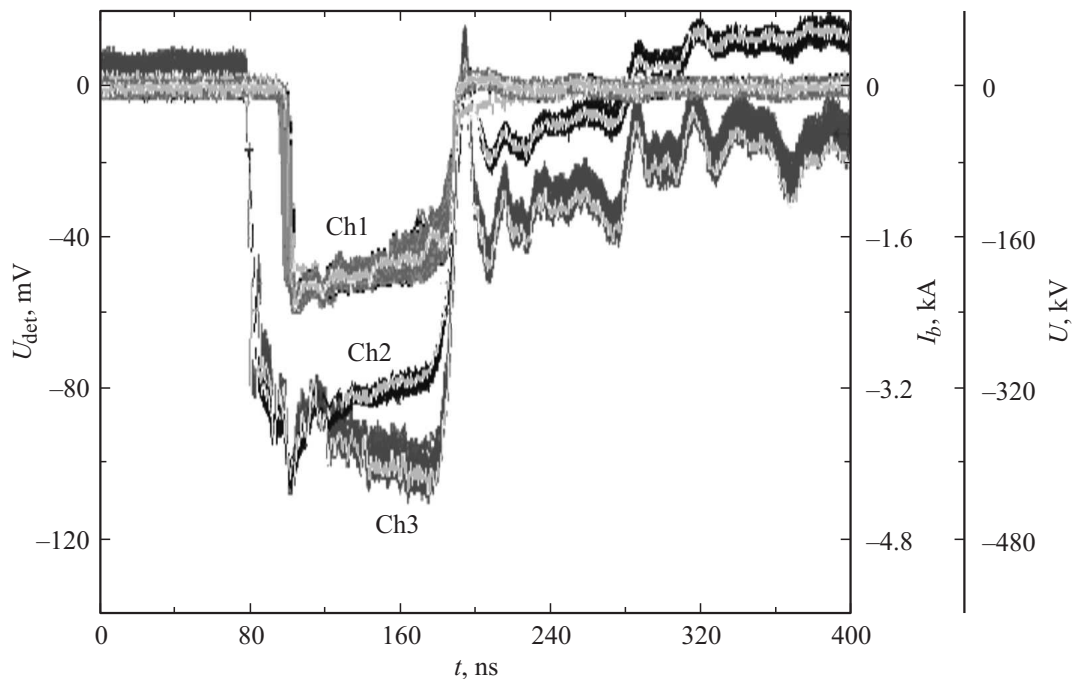


**Рис. 2.** Результаты численного моделирования: *a* — усредненный по времени поток мощности на выходе области расчета и спектр генерации, *b* — напряжение на коаксиальном диоде с магнитной изоляцией и ток пучка, *c* — траектории пучка в различные моменты времени.

## Экспериментальная часть

Эксперимент был выполнен на модернизированном ускорителе „СИНУС-500-106“ как в однократном, так и импульсно-периодическом режимах с частотой повторения импульсов до 100 Hz. Длительность импульса напряжения составляла 106 ns и достигалась за счет использования в конструкции ускорителя комбинированной формирующей линии, состоящей из коаксиального и спирального участков [17]. Локальный выброс импульса напряжения вблизи 30 ns (рис. 3, 4) обусловлен неидеальным согласованием волновых сопротивлений

коаксиального и спирального участков. Общий вес двухсекционного соленоида с двухканальным источником питания от промышленной сети составлял около 60 kg. Потребляемая соленоидом мощность составляла 14 kW, что позволяло ограничиться воздушным охлаждением его катушек. Для вывода излучения в открытое пространство использовалась рупорная антенна с диаметром выходной апертуры 320 mm и толщиной полиэтиленового окна 22 mm. Регистрация микроволнового излучения проводилась с помощью СВЧ-диагностики трехсантиметрового диапазона длин волн. Для регистрации осциллограмм детектированных СВЧ-сигналов,



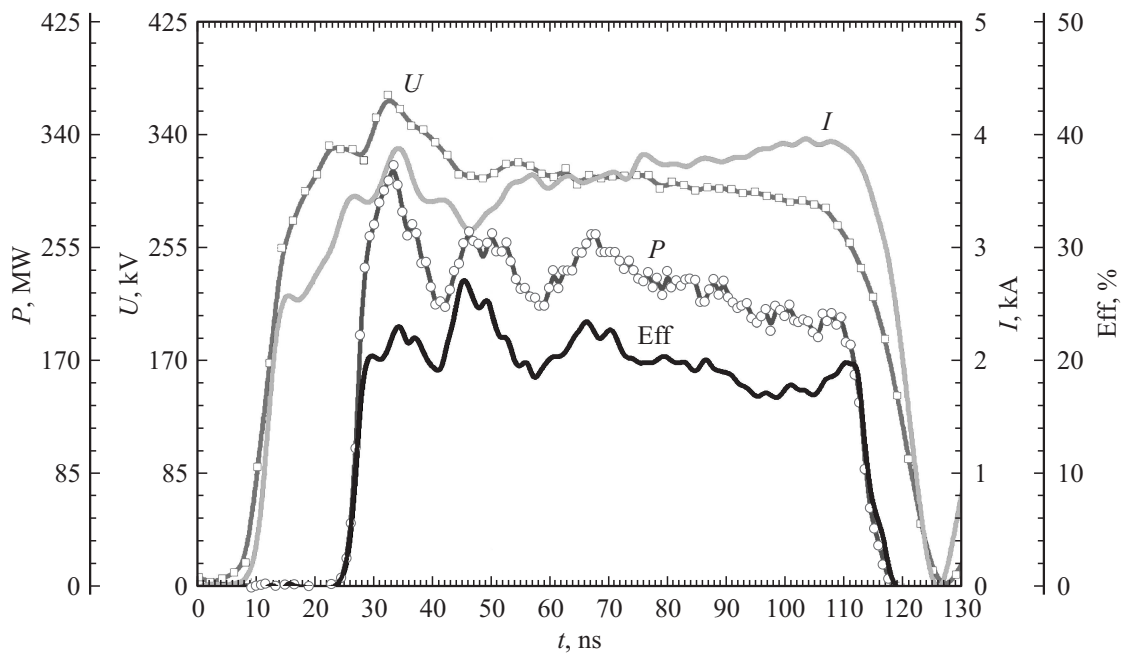
**Рис. 3.** Пакет из 100 импульсов на частоте повторения 100 Hz (Ch1 — осциллограммы продетектированных СВЧ-сигналов, Ch2 — напряжения в диоде, Ch3 — тока диода).

напряжений на диоде, токов диода использовался осциллограф серии Tektronix TDS7404. Для измерений спектра генерируемых импульсов применялся встроенный в осциллограф аппарат быстрого преобразования Фурье. Измерение энергии в СВЧ-импульсе проводилось с использованием апертурного калориметра трехсантиметрового диапазона [18], который располагался перед излучающим рупором и полностью перекрывал его апертуру. Мощность СВЧ-импульса определялась по измеренной энергии с учетом формы его огибающей.

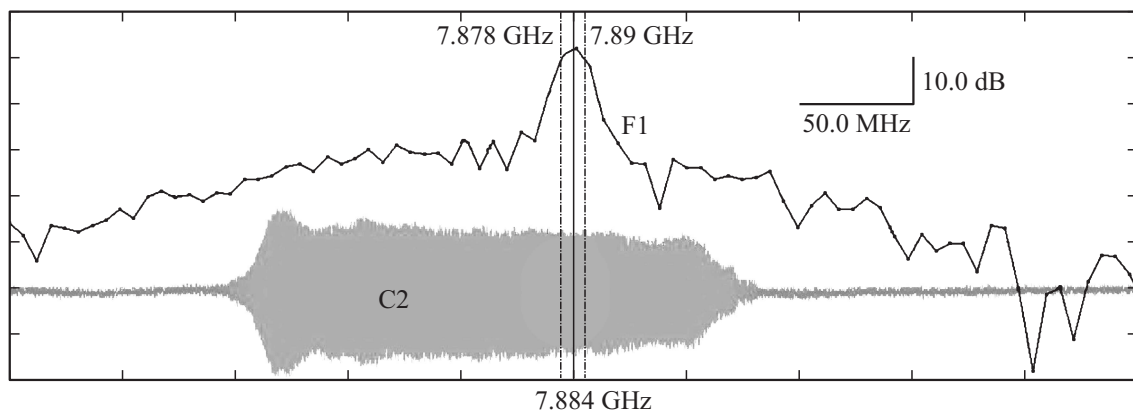
Для параметров электронного пучка и конфигурации силовой линии магнитного поля, близких к расчетным (ток пучка — 3.5 kA, энергия электронов — 320 keV,  $I_1 = 61$  A,  $I_2 = 65$  A), в эксперименте был получен стабильный пачечный (длительность пачки до 10 s) импульсно-периодический (частота следования импульсов 100 Hz) режим генерации РЛОВ-PP с длительностью микроволнового излучения 87 ns (рис. 3). Энергия, измеренная апертурным калориметром, в пачке из 10 импульсов с частотой повторения 20 Hz составила около 200 J. В пересчете на один импульс это соответствует КПД прибора по преобразованию энергии из электронного пучка в электромагнитное излучение 18%. Пересчет на пиковую мощность генерации, с использованием вольт-ваттной калибровки детектора дает значение  $P_{\text{peak}} \approx 320$  MW (рис. 4). Как видно из данного рисунка, эффективность генератора по мощности достигает максимального значения 27% ( $P_{\text{peak}} \approx 270$  MW) на 45 ns и превышает 20% в течение большей части микроволнового импульса. Десинхронизация между максимальной мощностью и эффективностью генерации

связана с работой генератора в пониженных магнитных полях. В данном эксперименте генератор был настроен по магнитному полю для энергии электронов 320 keV. При увеличении энергии электронов до 370 keV происходит смещение области циклотронного провала в сторону более высоких магнитных полей. Соответственно в этом же направлении должно смещаться и оптимальное (соответствующее максимальной эффективности генератора) рабочее магнитное поле. Ширина спектра по уровню — 3 dB для одиночного импульса микроволнового излучения (рис. 5) составила 12 MHz (максимум соответствует частоте 7.88 GHz). Это свидетельствует о высокой стабильности частоты излучения. В пределах пачки центральная частота менялась не более чем на 10 MHz. Это изменение было связано с нестабильностью параметров электронного пучка от импульса к импульсу. Пространственное распределение плотности потока мощности СВЧ-излучения соответствовало волне  $TM_{01}$ . При повышении мощности в пучке на  $\approx 15\%$  средняя энергия СВЧ-импульса возрастала до  $\approx 23$  J, а энергетический КПД генератора оставался на уровне 18% при длительности излучения около 87 ns.

Следует отметить, что в пределах пачки разброс амплитуд микроволновых импульсов коррелирует с соответствующим разбросом тока пучка и напряжения на КДМИ (рис. 3). Увеличение разброса к концу микроволновых импульсов, по-видимому, можно объяснить ухудшением условий токопрохождения вдоль пространства взаимодействия. При удалении пучка от ЗС путем уменьшения тока  $I_1$  в первой секции соленоида форма микроволновых сигналов становилась близкой к пря-



**Рис. 4.** Режим однократной генерации ( $U$  — осциллограмма напряжения на диоде,  $I$  — тока диода,  $P$  — микроволновая мощность,  $\text{Eff} = P/(UI)$  — эффективность генерации).



**Рис. 5.** Спектр генерации для одиночного импульса ( $C2$  — радиосигнал,  $F1$  — результат фурье-преобразования радиосигнала).

могальной при одновременном снижении мощности и эффективности генерации. В противоположном случае падала длительность сигналов, а их форма становилась близкой к треугольной. Высокая эффективность (близкая к расчетной) и стабильность генерации, по-видимому, связаны с условиями длинноимпульсного режима. Можно полагать, что разлет катодной плазмы не только увеличивает площадь эмиссионной поверхности, но и делает область эмиссии более равномерной и, таким образом, нивелирует эффект малого числа эмиссионных центров на кромке катода в условиях пониженных магнитных полей.

Другой эффект, который наблюдался в процессе экспериментального исследования генератора, был, по-видимому, связан с процессами на поверхности электродинамической структуры генератора и в тракте вывода

излучения в открытое пространство. В течение первых нескольких десятков импульсов после переборки системы с напуском воздуха или длительных перерывов в работе при выключенной вакуумной системе форма огибающей СВЧ-импульса была близка к треугольной при длительности 60–70 ns. По мере работы генератора в импульсно-периодическом режиме форма сигнала и длительность стабилизировались и становились близкими к оптимальным (рис. 3). Возможное объяснение этому эффекту может быть связано с эффектом „тренировки“ поверхности электродинамической системы ЛОВ-РР и внутренней (вакуумной) поверхности рупорного окна в интенсивных ВЧ-полях [7]. По-видимому, в нерабочем состоянии установки на данных поверхностях происходила адсорбция газа. В условиях мощной и длительной микроволновой генерации, а также ультрафиолето-

вой подсветки со стороны катода создавались условия для возникновения СВЧ-разряда. В процессе работы установки поверхности постепенно очищались и, как следствие, происходила стабилизация формы импульса, включая задний фронт.

## Заключение

В рамках нестационарной численной модели проанализировано влияние эффекта расширения катодной плазмы на работу РЛОВ-РР 3 см диапазона длин волн. Показано, что подбором конфигурации ЭДС-генератора и профиля силовой линии ведущего магнитного поля обеспечиваются условия для длинноимпульсной генерации без существенного изменения характеристик выходного излучения. Данный результат нашел подтверждение в процессе экспериментального исследования генератора. В трехсантиметровом диапазоне длин волн реализован эффективный ( $\approx 27\%$ ) режим генерации в пониженном магнитном поле 0.36 Т с длительностью микроволнового импульса 87 ns. КПД прибора по преобразованию энергии из электронного пучка в электромагнитное излучение составил 18%. Селективное возбуждение рабочей волны  $TM_{01}$  осуществлялось в ЗС с увеличенным поперечным размером ( $D/\lambda \approx 1.3$ ). Высокая эффективность и стабильность генерации в пониженных магнитных полях достигнута за счет сильной декомпрессии магнитного потока ( $B_{\text{cathode}}/B_{\text{SWS}} \approx 1.7$ ), в котором формируется и транспортируется электронный пучок. Предполагается, что расширение катодной плазмы могло оказывать позитивное влияние на качество электронного пучка в пониженных магнитных полях за счет более однородной границы эмиссии. Следующим шагом настоящей работы может быть использование в конструкции генератора постоянных магнитов, предварительный дизайн которых опубликован в работе [19].

Авторы выражают благодарность коллективу отдела физической электроники ИСЭ СО РАН за помощь при проведении экспериментальной части работ.

## Список литературы

- [1] Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д., Сморгонский А.В., Цопп Л.Э. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. Вып. 4. С. 232–235.
- [2] Гунин А.В., Кицанов С.А., Климов А.И., Коровин С.Д., Пегель И.В., Полевин С.Д., Ройтман А.М., Ростов В.В., Степченко А.С., Сухов М.Ю. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 84–88.
- [3] Коровин С.Д., Полевин С.Д., Ройтман А.М., Ростов В.В. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 56–61.
- [4] Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 6. Вып. 19. С. 1168–1171.
- [5] Kovalev N.F., Nechaev V.E., Petelin M.I., Zaitsev N.I. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. Vol. 26. N 3. P. 246–251.
- [6] Коровин С.Д., Месяц Г.А., Пегель И.В., Полевин С.Д., Тараканов В.П. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 6. С. 27–36.
- [7] Батраков А.В., Карлик К.В., Кицанов С.А., Климов А.И., Коновалов И.Н., Коровин С.Д., Месяц Г.А., Озур Г.Е., Пегель И.В., Полевин С.Д., Проскуровский Д.И., Сухов М.Ю. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 4. С. 39–46.
- [8] Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Ковалёв Н.Ф., Копелович Е.А., Савельев А.В., Солуянов Е.И., Фукс М.И., Ястребов В.В. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 11. С. 102–105.
- [9] Бункин Б.В., Гапонов-Грегов А.В., Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д., Месяц Г.А., Осипов М.Л., Отливанчик Е.А., Петелин М.И., Прохоров А.М., Ростов В.В., Сараев А.П., Сисакян И.П., Сморгонский А.В., Суворов В.А. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 9. С. 61–65.
- [10] Куркан И.К., Ростов В.В., Тотменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 10. С. 43–47.
- [11] Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В., Тотменинов Е.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. Вып. 12. С. 1189–1196.
- [12] Ростов В.В., Тотменинов Е.М., Яландин М.И. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 11. С. 85–92.
- [13] Song W., Chen C.H., Sun J., Zhang X.W., Shao H., Song Z.M., Huo S.F., Shi Y.C., Li X.Z. // Phys. Plasmas. 2012. Vol. 19. P. 103 111 (1–5).
- [14] 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.
- [15] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.
- [16] Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Samsonov S.V. // Int. J. Infrared Mill. 1995. Vol. 16. N 4. P. 745.
- [17] 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.
- [18] Klimov A.I., Vykhodtsev P.V., Elchaniniov A.A., Kovalchuk O.B., Kurkan I.K., Polevin S.D., Totmeninov E.M., Rostov V.V. // Proc. of the 15<sup>th</sup> Intern. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia, 2008. P. 422–424.
- [19] Gunin A.V., Rostov V.V., Totmeninov E.M., Sharypov K.A., Shpak V.G., Yalandin M.I., Yermakov A.E., Zhakov S.V., Demol G., Vezinet R. // Proc. of 18<sup>th</sup> Int. IEEE Conf. Pulsed Power Plasma Science. Chicago, 2011. P. 371–376.