

09:10

## Мощные релятивистские СВЧ-генераторы на основе лампы обратной волны с модулирующим резонансным рефлектором

© В.В. Ростов,<sup>1</sup> Е.М. Тотьменинов,<sup>1</sup> М.И. Яландин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: totm@lfe.hcei.tsc.ru

<sup>2</sup> Институт электрофизики УрО РАН,  
620016 Екатеринбург, Россия  
e-mail: yalandin@ier.uran.ru

(Поступило в Редакцию 26 декабря 2007 г.)

Обобщены результаты цикла теоретических и экспериментальных исследований релятивистской лампы обратной волны с модулирующим резонансным рефлектором, используемым для отражения встречной волны и ее вывода в направлении коллектора электронов. Показано существенное влияние предварительной модуляции электронного пучка в области рефлектора на пусковые условия генерации, селективные свойства и эффективность генератора, которая может достигать значения около 40% при использовании сильного магнитного поля, транспортирующего сильноточный пучок. В пониженных магнитных полях, которые применялись для импульсно-периодического режима и которые в 1.5–2 раза меньше величин, отвечающих циклотронному резонансу со встречной волной, КПД генератора (30–35% при длине волны 8 мм) ограничивается позиционным и скоростным разбросом частиц. Продемонстрирована механическая перестройка частоты генерации в диапазоне около 10% от импульса к импульсу при частоте повторения 1–50 Hz с мультигигаваттным уровнем микроволновой мощности, а также возможность наращивания мощности и энергии микроволновых импульсов за счет повышения поперечных размеров замедляющей системы.

PACS: 84.40.Fc

### Введение

На основе сильноточного электронного пучка можно осуществлять генерацию микроволновых импульсов, мощность которых на несколько порядков выше, чем в слаботочных приборах с накаливаемыми катодами, и эта мощность ограничивается в пределе процессами развития высокочастотного пробоя. Первым релятивистским генератором, реализованным в эксперименте, была релятивистская лампа обратной волны (РЛОВ), обеспечившая на длине волны 3 см импульсную мощность порядка  $10^8$  W [1]. В конструкции генератора применялось запредельное сужение для отражения обратной волны типа  $TM_{01}$ , средний диаметр замедляющей системы (ЗС) был примерно равен длине волны излучения. Последующие теоретические и экспериментальные исследования данной схемы генератора позволили повысить КПД от уровня 10–15 до 30–40% за счет использования неоднородных замедляющих систем с профилированием связи с синхронной пространственной гармоникой и ее фазовой скорости (реализованы режимы генерации излучения в сантиметровом диапазоне длин волн с мощностью  $\sim 10^9$  W [2–5]).

Наблюдаемые ограничения длительности импульсов и мощности с уровнем более 1 GW на длине волны 3 см авторы работы [6] связали с процессами высокочастотного пробоя и появления плазмы в ЗС, которые развивались за время порядка единиц наносекунд. Это

подтолкнуло к попыткам увеличить поперечные размеры ЗС, перейти на более высокие типы рабочей волны и к альтернативным схемам генератора, например, с использованием брэгговских отражателей и трансформаторов мод [7]. Такой подход позволил существенно продвинуться в решении проблемы ограничения длительности генерируемых импульсов излучения, однако нарастающие трудности селекции мод препятствовали достижению высоких значений КПД.

К числу альтернативных схем можно отнести и конструкцию РЛОВ с резонансным сосредоточенным рефлектором для отражения обратной волны [8]. Особенности данного варианта прибора являются наличие эффективной предварительной модуляции электронного пучка по энергии в области рефлектора и увеличенный поперечный размер замедляющей структуры ( $D/\lambda \approx 1.3–1.5$ , где  $D$  — средний диаметр ЗС,  $\lambda$  — длина волны излучения). Ряд экспериментов показал возможность повышения мощности и энергии микроволнового излучения, механической перестройки частоты (путем смещения рефлектора), а также увеличения эффективности генерации в слабых магнитных полях, что актуально для импульсно-периодического режима работы генератора.

В настоящей работе кроме обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований предложенной схемы генератора, которые были ранее опубликованы в печати [8,9], приводятся новые неопублико-

ванные результаты. Отметим, что эти данные существенно расширили представления о возможностях данного СВЧ-генератора при использовании сильного магнитного поля, превышающего область циклотронного поглощения встречной волны. В частности, впервые мощность одномодовой генерации достигла уровня 4–5 GW на длине волны 3 см при эффективности более 22%. Демонстрируются также особенности и эффективный режим компактного генератора микроволнового излучения в длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн.

## Теоретический анализ

Общий вид конструкции электродинамической системы генератора, которая состоит из ЗС с увеличенным поперечным размером и резонансного рефлектора, представлен на рис. 1. В данной схеме генератора отражение падающей волны  $E_{01}$  от резонансного рефлектора происходит в режиме холостого хода вследствие возбуждения в нем запертой симметричной моды  $V_{02}$ . При этом амплитуда поля произвольной компоненты электрического поля на радиусе пучка в области рефлектора может в несколько раз превышать амплитуду бегущей волны в волноводе [9]. Таким образом, в ограниченной области пространства существуют условия для эффективной предварительной модуляции электронного потока по энергии.

Основные закономерности энергообмена могут быть получены при решении системы уравнений [9,10], описывающих движение электронов в высокочастотном поле и возбуждение встречной волны для ультра-релятивистских значений энергии частиц ( $\gamma \gg 1$ ). В рамках численного анализа предварительная модуляция описывается комплексным параметром модуляции  $\alpha = |\alpha| \exp(i \arg \alpha)$  [9], модуль которого характеризует глубину модуляции электронов по энергии в области рефлектора, а аргумент (фаза модуляции) определяет

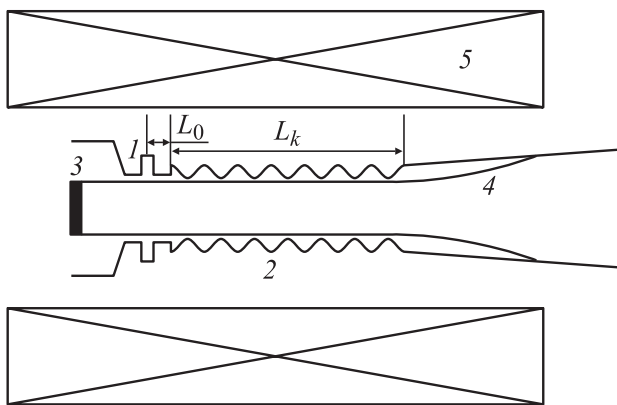


Рис. 1. Конструкция генератора: 1 — резонансный рефлектор, 2 — замедляющая система, 3 — взрывоэмиссионный катод, 4 — электронный пучок, 5 — соленоид.

положение формирующегося сгустка относительно фазы поля синхронной волны на входе в пространство взаимодействия (при  $\arg \alpha = \pi/2$  максимум высокочастотного тока попадает в центр области тормозящих фаз поля). Параметр фазы модуляции определяется самосогласованным образом в процессе итерационной процедуры при нахождении решения краевой задачи:

$$\arg \alpha \approx -\frac{\pi}{2} - 2\pi\Lambda - \Lambda(1 - \delta)kd/2\gamma_0^2 + \varphi_b, \quad (1)$$

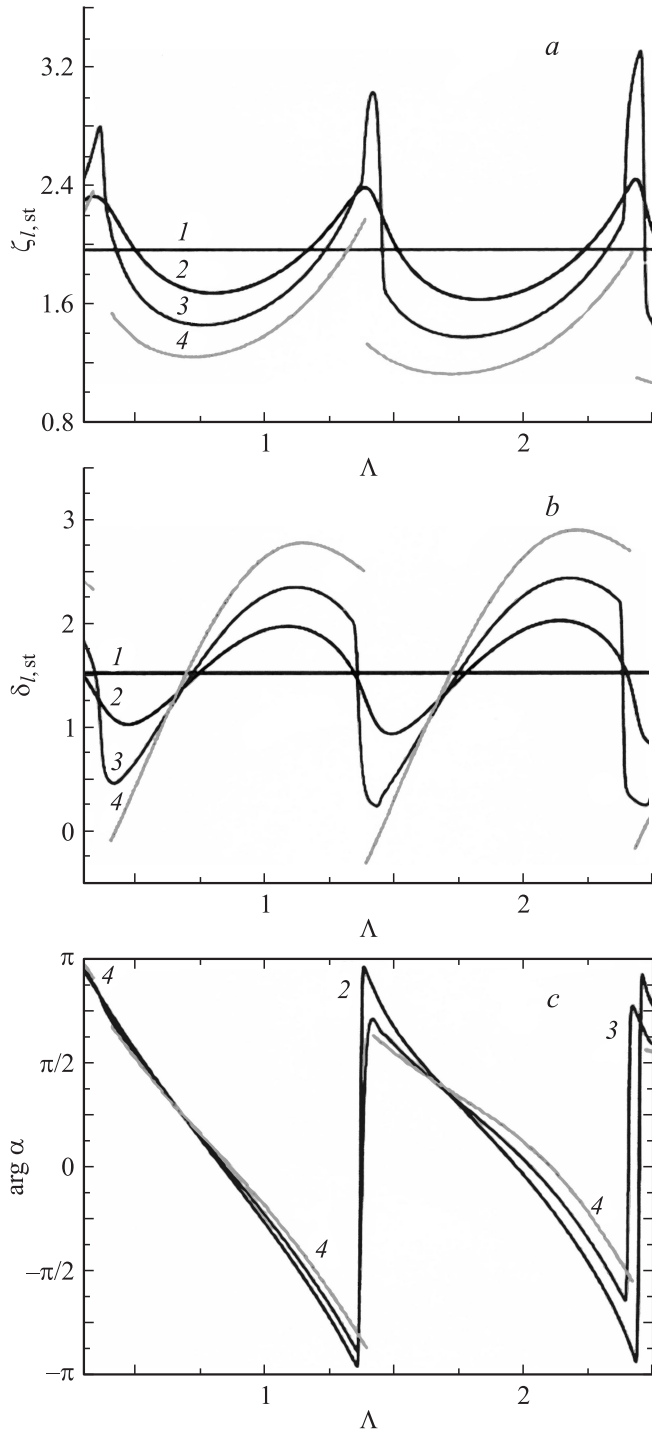
где  $\Lambda = L_0/d$ ,  $L_0$  — протяженность участка дрейфа,  $d$  — период гофрировки,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $\gamma_0$  — релятивистский фактор,  $\delta = 2\gamma_0^2(h_{-1}/k - 1)$  — расстройка синхронизма,  $h_{-1}$  — продольное волновое число синхронной (–1-й) пространственной гармоники,  $\varphi_b$  — разность фаз  $z$ -компонент электрических полей –1-й пространственной гармоники и встречной волны в месте начала ЗС (для случая рис. 1  $\varphi_b = 0$ ).

Решением линеаризованной системы уравнений [9] являются пусковые условия генерации (рис. 2): безразмерные стартовые длина генератора  $\xi_{l,st} = (2\pi I)^{1/3} \times kL_{k,st}/2\gamma_0^2$  и расстройка синхронизма  $\delta_{l,st} = 2\gamma_0^2 \times (h_{-1}/k - 1)/(2\pi I)^{1/3}$ , где  $I = 2\gamma_0^3 e Z_{-1} J_b / (\pi m c^2)$  — параметр приведенного тока,  $Z_{-1}$  — сопротивление связи пучка с синхронной гармоникой,  $e$  и  $m$  — соответственно заряд и масса электрона,  $J_b$  — ток пучка,  $L_{k,st}$  — стартовая длина ЗС генератора.

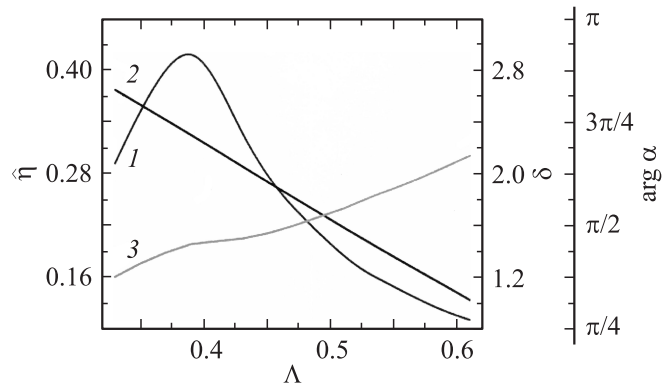
Эффективность энергообмена  $\eta = \hat{\eta}\gamma_0/(\gamma_0 - 1)$ , где  $\hat{\eta}$  — приведенный КПД [9], определяется в результате решения нелинейной краевой задачи (рис. 3). Режимы с высокой эффективностью вплоть до 60% реализуются при выполнении условия оптимального энергообмена  $|\alpha|_{opt} \approx (4\pi I)^{-1/2}$  [9], которое устанавливает связь между глубиной предварительной модуляции частиц и параметром приведенного тока. Также заметим, что для режимов с высоким КПД фаза модуляции находится вблизи значения  $\arg \alpha \approx 0.75\pi$ , где стартовый ток генератора приближается или даже превышает значение, соответствующее отсутствию предварительной модуляции. В этом случае происходит ухудшение селективных свойств генератора, что, вероятно, должно создать определенные трудности при реализации прибора в эксперименте. Поэтому представляется оптимальным выбор значения фазы модуляции  $\arg \alpha \approx 0.5\pi$  с использованием неоднородной ЗС генератора. В данном случае также реализуется высокая расчетная эффективность энергообмена, а уменьшение длины однородного участка ЗС в некоторой степени затрудняет возбуждение „паразитных“ колебаний.

Результаты численного анализа показывают возможность реализации режимов работы РЛОВ, которые ранее были трудно осуществимы. Использование резонансного рефлектора в качестве отражателя встречной волны позволяет увеличить диаметр катода. Это, в свою очередь, ведет к снижению напряженности радиальной компоненты электрического поля на кромке катода и, как следствие, уменьшается поперечная скорость электронов

пучка. Как показано в [8], с увеличением поперечного размера ЗС падает как  $D^{-2}$  приведенный параметр силовой группировки, что приводит к сужению ширины циклотронного резонанса. В целом оба обстоятельства обеспечивают более эффективную генерацию в слабых магнитных полях.



**Рис. 2.** Стартовые параметры генератора (*a, b*) и фаза модуляции (*c*) в зависимости от параметра  $\Lambda$  при различной глубине модуляции частиц  $(2\pi I)^{1/3}|\alpha|$ : 1 —  $(2\pi I)^{1/3}|\alpha| = 0$ ; 2 — 0.3; 3 — 0.6; 4 — 0.9.



**Рис. 3.** Типичные расчетные зависимости приведенного КПД — 1, фазы модуляции — 2, расстройки синхронизма — 3 от параметра  $\Lambda$ :  $\xi_k = 3.4$ ,  $I = 0.1$ ,  $|\alpha| = 1.1$ , где  $\xi_k = kL_k/2\gamma_0^2$ .

Наличие эффективной предварительной модуляции частиц делает данный прибор похожим на двухсекционные генераторы с распределенной областью торможения сгустков, для которых теоретические значения эффективности достигают около 60% [11]. Проведенные численные расчеты подтверждают данную аналогию. Конструкция генератора позволяет увеличить диаметр электронного пучка. Для фиксированного значения тока это приводит к снижению его плотности и соответственно роли объемного заряда пучка в процессе энергообмена. Таким образом, существуют предпосылки для повышения эффективности генератора в эксперименте.

Другая возможность связана с расширением полосы перестройки частоты генерации без изменения параметров ЗС и электронного пучка. В ее основе лежит зависимость расстройки синхронизма от длины участка дрейфа  $L_0$  и глубины предварительной модуляции частиц. В этом случае перестройка частоты генерации может осуществляться простым механическим способом посредством продольного сдвига ЗС генератора при фиксированном положении резонансного рефлектора.

Для фиксированного уровня выходной мощности генерации увеличение поперечного размера ЗС приводит к снижению напряженности нормальной компоненты электрического ВЧ-поля на поверхности гофрировки. Соответственно снижается вероятность возникновения взрывоэмиссионной плазмы на поверхности гофр, которая может приводить к ограничению импульсной мощности излучения или даже срыву генерации [11]. Таким образом, существуют предпосылки для повышения длительности и импульсной мощности микроволнового излучения.

Для проведения численных оптимизационных экспериментов с целью разработки экспериментальных конструкций генераторов применялись PIC-код KARAT [12] и программа на основе метода матриц рассеяния [13].

## Результаты экспериментов

В ИСЭ СО РАН эксперименты выполнялись на ускорителях серии „СИНУС“ как в однократном, так и импульсно-периодическом режимах с частотой повторения до 100 Нз. Регистрация микроволнового излучения проводилась с помощью комплексов СВЧ-диагностики 3- и 8-сантиметровых диапазонов длин волн. Для регистрации осциллограмм детектированных СВЧ-сигналов, напряжений на диоде, токов диода использовались осциллографы серии ТЕКТРОНИХ. Для измерений спектров генерируемых импульсов применялись: полосовой фильтр, гетеродинная схема, встроенный в осциллограф ТЕКТРОНИХ аппарат быстрого преобразования Фурье. Эксперименты по генерации микроволнового излучения миллиметрового диапазона длин волн проводились в ИЭФ УрО РАН с использованием компактных импульсно-периодических ускорителей. В их составе применялись высоковольтный генератор РАДАН-30ЗБП и гибридный модулятор на базе твердотельного драйвера СМ-3Н с дополнительной формирующей линией и обостряющим азотным разрядником высокого давления. Мощность микроволновых импульсов измерялась „быстрым“ германиевым детектором на горячих носителях и вакуумированным калориметром с жидкостным поглотителем.

### а) Высокоэффективная РЛОВ 3-сантиметрового диапазона длин волн в сильном магнитном поле

Эксперимент был выполнен с использованием импульсно-периодического наносекундного ускорителя электронов „СИНУС-6К“, который генерировал в однократном режиме электронный пучок с длительностью около 20 ns при напряжении на катоде  $\approx 500$  kV и токе диода  $\approx 4$  kA. Диаметр внешней кромки катода составлял 32 mm. Средний диаметр ЗС генератора превышал длину волны излучения в 1.3 раза. При оптимальной длине участка дрейфа  $L_0$  в эксперименте был получен устойчивый режим генерации с эффективностью  $37 \pm 5\%$  на частоте 9.93 GHz (рис. 4). Индукция продольного магнитного поля, которое создавалось импульсным соленоидом, составляла 2.7 Т. Ширина спектра на уровне  $-3$  dB не превышала 100 МГц. Микроволновая мощность, измеренная путем интегрирования диаграммы направленности, составила  $0.75 \pm 0.11$  GW. Среднеквадратичное отклонение амплитуды микроволновых импульсов в указанном режиме работы генератора приблизительно в 2–3 раза превышало соответствующее значение для амплитуд ускоряющего напряжения на катоде.

Попытки дальнейшего наращивания эффективности генератора за счет приближения рефлектора к ЗС наталкивались на проблему нелинейной конкуренции и возбуждения незапланированных колебаний. Происходило существенное ухудшение воспроизводимости микро-

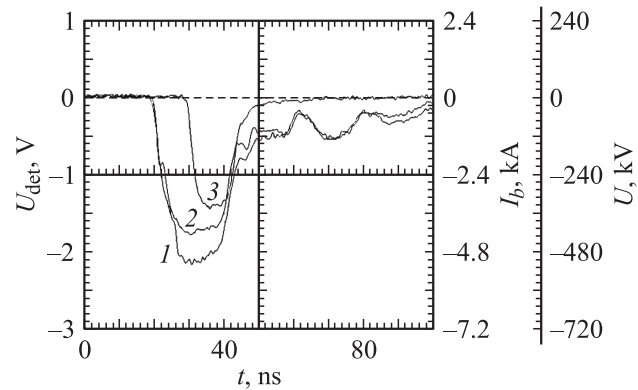


Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения на диоде ( $U$ ) — 1, тока диода ( $I_b$ ) — 2 и сигнала с микроволнового детектора ( $U_{det}$ ) — 3.

волновых импульсов. При этом относительный разброс их амплитуд мог превышать 100%. В режиме малых амплитуд наблюдалось повышение несущей частоты до 10.8 GHz, которую можно идентифицировать с резонансным колебанием ЗС вблизи  $\pi$ -вида моды  $TM_{01}$ . Также наблюдались сигналы с признаками сложной динамики переходного процесса [14]. Данные эффекты обусловлены ухудшением селективных свойств генератора вследствие роста стартового тока, который, согласно линейной теории, происходит при уменьшении длины участка дрейфа  $L_0$ .

### б) Эффективная РЛОВ 3-сантиметрового диапазона длин волн в слабом магнитном поле

На ускорителе „СИНУС-6К“ были выполнены эксперименты по реализации эффективного режима генерации РЛОВ в слабых магнитных полях (ниже области циклотронного поглощения встречной волны) в однократном и импульсно-периодическом режимах. Для режима однократных импульсов параметры электронного пучка составляли: напряжение на диоде 600 kV, ток диода 5.5 kA. Средний диаметр ЗС генератора превышал длину волны излучения в 1.5 раза. Диаметр внешней кромки графитового катода составлял 39 mm. Ведущее магнитное поле создавалось импульсным соленоидом. При оптимальном положении рефлектора относительно ЗС генератора ( $L_0$ ) был реализован эффективный режим генерации с КПД  $\approx 24\%$  в магнитном поле 0.7 Т на частоте 10.2 GHz (рис. 5) [8]. В данном режиме длительность СВЧ-импульсов находилась в пределах 9–11 ns.

Для эксперимента в импульсно-периодическом режиме был изготовлен двухсекционный соленоид постоянного тока с замкнутой системой охлаждения. Потребляемая соленоидом мощность составляла 20 kW. В месте расположения катода магнитное поле в 1.4 раза превышало значение поля в области расположения рефлектора и ЗС. Усиление магнитного поля на катоде способствовало более равномерной эмиссии электронов [15]. Диаметр

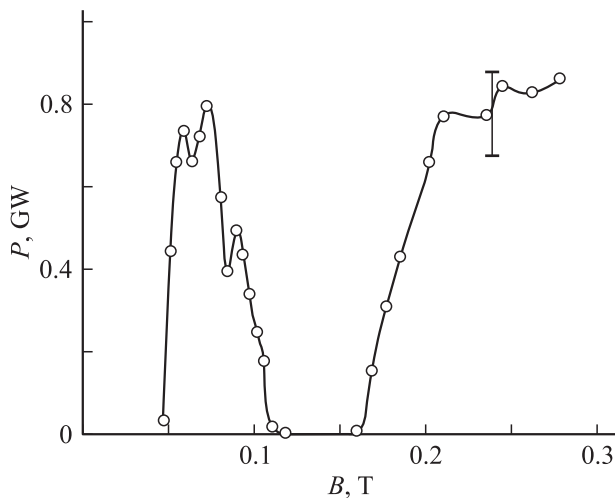


Рис. 5. Зависимость мощности микроволнового излучения от ведущего магнитного поля.

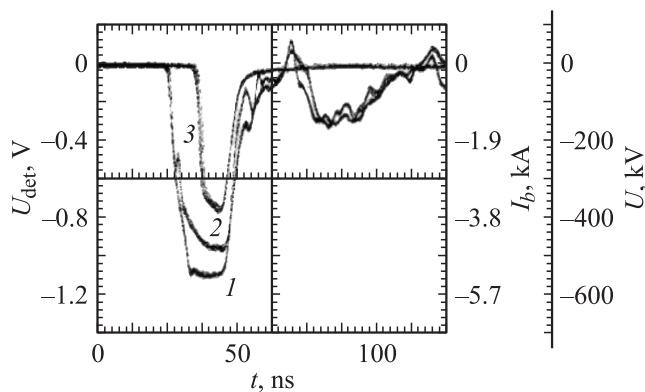


Рис. 6. Пакет из 15 последовательно чередующихся сигналов при работе генератора в режиме с частотой следования 100 pulse/s. Напряжение на диоде ( $U$ ) — 1, ток диода ( $I_b$ ) — 2 и сигнал с микроволнового детектора ( $U_{det}$ ) — 3.

внешней кромки графитового катода составлял 34 мм. В результате декомпрессии диаметр электронного пучка плавно увеличивался и стабилизировался около значения 40 мм в ЗС. Для полного отражения встречной волны в конструкции генератора была использована комбинация из двух рефлекторов [9].

В импульсно-периодическом режиме работы ускорителя с частотой повторения 100 Hz и параметрами электронного пучка: напряжение на диоде 530 kV, ток диода 4.5 kA была получена микроволновая мощность излучения  $0.5 \pm 0.1$  GW на частоте генерации 10 GHz при длительности СВЧ-импульса на полувысоте около 12 ns (рис. 6). В данном режиме среднеквадратичное отклонение амплитуды СВЧ-импульсов приблизительно совпадало с соответствующей дисперсией амплитуд ускоряющего напряжения на катоде ( $\approx 1\%$ ). При перестройке катодного напряжения с помощью тригatronного запуска в диапазоне 500–560 kV в эксперименте

была зафиксирована электронная перестройка частоты около 1%.

**в) РЛОВ 8-сантиметрового диапазона длин волн с расширенной полосой механической перестройки частоты генерации в слабом магнитном поле**

Эксперименты были выполнены с использованием наносекундного импульсно-периодического ускорителя электронов „СИНУС-7“ [16], который мог работать в режиме с частотой повторения до 100 Hz. Длительность импульса напряжения составляла 50 ns. В режиме однократных импульсов ускоритель генерировал электронный пучок со следующими параметрами: напряжение на диоде  $\approx 1.2$  MV, ток диода  $\approx 16$  kA. При этом амплитуда тока пучка, поступающего в электродинамическую систему генератора, составляла около 13 kA. Ведущее магнитное поле создавалось импульсным соленоидом. Смещение частоты генерации происходило посредством перемещения ЗС относительно фиксированного положения резонансного рефлектора, что приводило к изменению длины участка дрейфа  $L_0$ . Средний диаметр ЗС генератора в 1.5 раза превышал длину волны излучения.

В эксперименте [17] реализован режим с полосой перестройки частоты генерации около 11% (3.44–3.85 GHz), по половинному уровню от максимальной мощности  $4 \pm 1$  GW (рис. 7), в слабых магнитных полях 0.41–0.49 T (для каждого значения  $L_0$  выбирался необходимый режим по магнитному полю). С учетом тока пучка, инжектированного в ЗС, максимальная эффективность генератора по мощности составила  $25 \pm 4\%$ . В пределах полосы перестройки длительность микроволновых импульсов на полувысоте изменялась в диапазоне 6–21 ns.

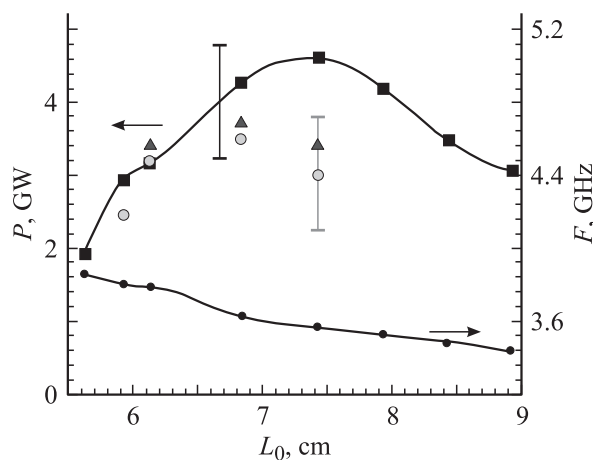
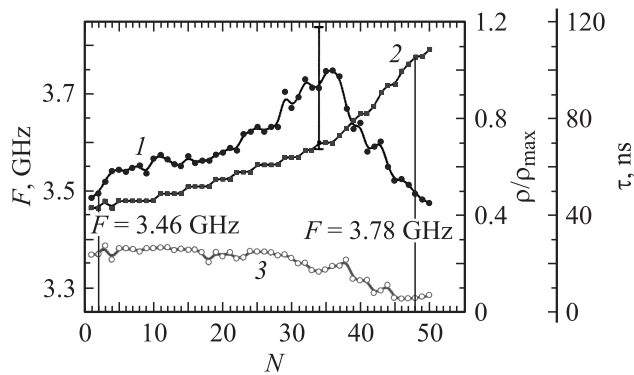


Рис. 7. Зависимости пиковой мощности ( $P$ ) и частоты генерации ( $F$ ) от положения резонансного рефлектора: ■ — измерения пиковой мощности с помощью волноводно-полоскового ответвителя, ▲ — апертурного калориметра, ● — короткого симметричного вибратора.



**Рис. 8.** Зависимости нормированной на максимальное значение пиковой плотности потока мощности излучения ( $\rho/\rho_{\max}$ , где  $\rho = P/S_{\text{eff}}$ ,  $P$  — принимаемая антенной мощность,  $S_{\text{eff}}$  — эффективная поверхность антенны) — 1, частоты генерации ( $F$ ) — 2 и длительности СВЧ-сигнала на полувысоте ( $\tau$ ) — 3 от номера импульса в пачке ( $N$ ).

Для импульсно-периодического режима был изготовлен соленоид квазипостоянного тока (длительностью около 1 с) с воздушным охлаждением. В импульсно-периодическом режиме работы ускорителя с частотой повторения 50 Hz параметры электронного пучка стабилизировались до необходимых значений (ток диода 15 кА, напряжение на диоде 1.05 MV) после первых 4–5 импульсов пачки, длительность которой составляла 1 с. За это время передвигающееся устройство изменяло длину участка дрейфа  $L_0$  на 22 мм. При этом диапазон изменения частоты генерации, по уровню  $-3$  dB от максимальной мощности, от импульса к импульсу составил 3.46–3.78 GHz (рис. 8), что соответствовало полосе перестройки около 9% [18]. В течение пачки магнитное поле поддерживалось постоянным на уровне  $\approx 0.4$  Т.

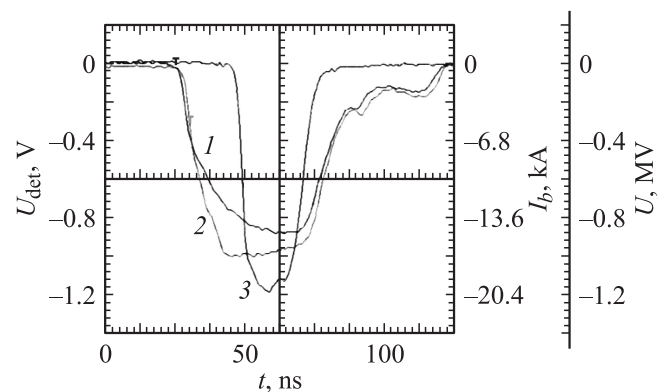
В режиме с максимальной плотностью потока мощности излучения на частоте 3.6 GHz (импульс ускорителя № 35) измеренное значение пиковой мощности генерации составило  $2.5 \pm 0.6$  GW. На фиксированной частоте генерации  $\approx 3.6$  GHz был реализован односекундный импульсно-периодический режим работы генератора с частотой повторения 50 Hz. В данном режиме стандартное отклонение пиковых значений протестированных микроволновых импульсов не превышало 3% при длительности СВЧ-импульса на полувысоте около 20 ns.

### г) Мультигигаваттная эффективная РЛОВ 3-сантиметрового диапазона длин волн в сильном магнитном поле

Эксперимент был выполнен на ускорителе „СИНУС-7“. Электронный пучок эмитировался графитовым катодом диаметром 44 мм. Для регистрации СВЧ-сигналов использовалась приемная антенна в виде открытого конца прямоугольного волновода с геометрическим сечением  $23 \times 10$  мм и поглотителями на внешней части

для уменьшения эффективного сечения антенны и снижения его частотной зависимости. Приемная антенна была расположена на расстоянии 4.5 м от излучающего рупора и для повышения ее электрической прочности пространство внутри нее и около входа было заполнено газом SF<sub>6</sub> (пространство около апертуры излучающего рупора также заполнялось этим газом). Измерение энергии в СВЧ-импульсе проводилось с использованием апертурного калориметра, который располагался непосредственно вакуумным окном излучающего рупора и полностью перекрывал его апертуру (пространство между излучающим рупором и калориметром заполнялось газом SF<sub>6</sub>). При этом длительность СВЧ-сигнала контролировалась с помощью приемной антенны, расположенной непосредственно за калориметром (часть мощности проходила через него). При оптимальных параметрах электронного пучка — напряжении на диоде 950 кV, токе диода 14.7 кА, положении рефлектора относительно ЗС  $L_0 \approx 23.5$  мм и магнитном поле 4.5 Т — был получен устойчивый режим генерации на частоте 9.4 GHz [19]. Микроволновая мощность, измеренная путем интегрирования диаграммы направленности излучения (соответствовала волне TM<sub>01</sub>), составила  $4.3 \pm 1.1$  GW при эффективности преобразования мощности из электронного пучка в электромагнитное излучение  $31 \pm 8\%$ . Длительность СВЧ-импульсов на половинном уровне от пиковой мощности составляла 20.6 ns (рис. 9). В данном режиме стандартное отклонение пиковых значений микроволновых импульсов относительно их среднего значения не превышало  $\pm 2\%$ . Измеренная апертурным калориметром энергия в микроволновом импульсе составила около 70 J, что соответствует импульсной мощности генерации  $3.4 \pm 0.5$  GW.

С увеличением мощности электронного пучка на 60% (напряжение на диоде  $\approx 1.2$  MV, ток диода  $\approx 19$  кА) происходило возрастание пиковой мощности в импульсах в соответствии с показаниями детектора от 4.3 до 5 GW при одновременном снижении эффективности генератора до 22%. При этом длительность СВЧ-сигналов уменьшалась до 18.2 ns. Измеренная в данном



**Рис. 9.** Осциллограммы импульсов тока диода ( $I_b$ ) — 1, напряжения на диоде ( $U$ ) — 2 и сигнала с лампового детектора ( $U_{\text{det}}$ ) — 3.

режиме энергия в микроволновом импульсе составила около 80 J.

#### д) Эффективная РЛОВ 8-миллиметрового диапазона длин волн в слабом магнитном поле

Исследование квазистационарной генерации РЛОВ диапазона частот 38 GHz проводилось с использованием компактного наносекундного сильноточного ускорителя [20]. В различных сериях экспериментов на катод электронного диода подавались ускоряющие импульсы длительностью 5 ns от двух различных источников с идентичным выходным сопротивлением 45  $\Omega$ . Высоковольтный генератор РАДАН-303БП формировал импульс с фронтом 1.5 ns (по уровням 0.2–0.8 амплитуды). Гибридный модулятор обеспечивал фронт импульса не более 0.5 ns. В обоих случаях на катоде достигались амплитуды напряжения  $-270$  kV. Взрывоэмиссионный графитовый катод находился в поле импульсно-периодического соленоида, в области с максимальным магнитным полем 2.2 Т. В коаксиальном магнитоизолированном диоде генерировался трубчатый электронный пучок с толщиной стенки  $\sim 0.4$  mm и средним диаметром 7.4 mm. При транспортировке в плавно спадающем магнитном поле диаметр пучка увеличивался и приближался к минимальному диаметру ЗС 9 mm.

В предварительном численном PIC-моделировании с помощью кода КАРАТ было показано, что оптимизация профиля силовой линии ведущего магнитного поля, геометрии и положения резонансного рефлектора, а также характеристик неоднородной ЗС обеспечивает расчетную эффективность квазистационарной генерации РЛОВ до 38% (рис. 10, *a*) даже при использовании магнитного поля ниже циклотронного резонанса. В расчетах ток пучка составлял 1.7 kA, а его мощность — около 450 MW.

Как показали эксперименты, высокая эмиссионная способность катода и улучшение качества пучка электронов реализуются наиболее близко к расчетным условиям моделирования для субнаносекундного времени нарастания напряжения на катоде и при наличии опережающего предимпульса, достигавшего амплитуды  $-15$  kV за время  $\sim 15$  ns в период зарядки формирующей линии, до момента пробоя обостряющего разрядника. При этом более однородную структуру трубчатого электронного пучка можно было наблюдать с помощью отпечатков пучка, формируемого в пониженном магнитном поле. При фронте ускоряющего напряжения 0.5 ns были реализованы хорошо воспроизводимые импульсы излучения (рис. 10, *b*) со структурой, соответствующей рабочей волне  $TM_{01}$ , и имевшие пиковую мощность до  $160 \pm 20$  MW.

Эти данные получены с помощью детекторных и калориметрических измерений, когда энергия излучения измерялась для пакетов из 5–10 импульсов при частоте следования 10 Hz. Пересчет энергии на единичный импульс указывал на максимальное значение до 0.64 J

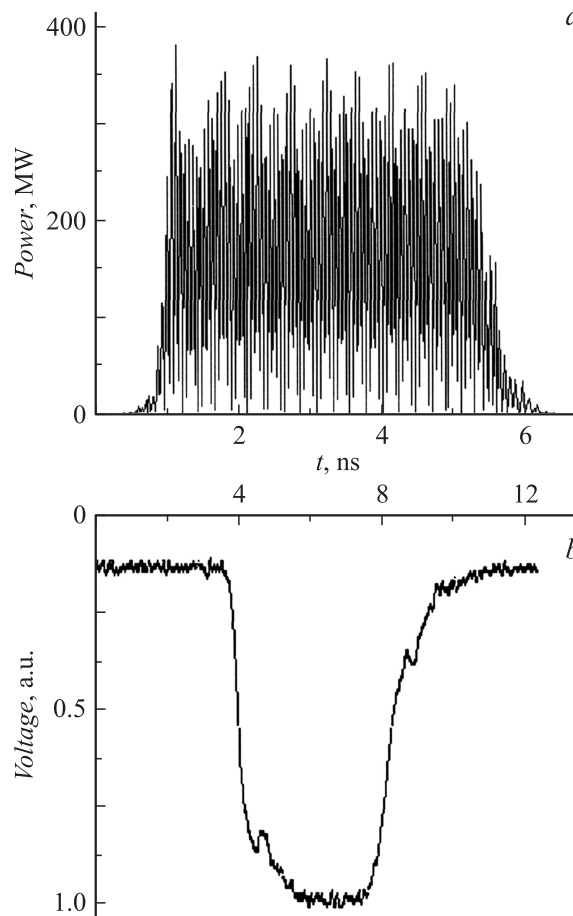


Рис. 10. Неусредненный поток СВЧ-мощности РЛОВ диапазоне 38 GHz на выходе из области расчета по PIC-модели — *a*, сигнал СВЧ-детектора в максимуме диаграммы направленности волны  $TM_{01}$ , соответствующий пиковой мощности излучения  $160 \pm 20$  MW — *b*.

при характерной длительности на полувысоте 3.8–4 ns. В том случае, когда фронт ускоряющего импульса был на уровне 1.5 ns, измеренная аналогичным образом мощность излучения находилась в диапазоне 100–130 MW. Этот факт можно связать с ухудшением однородности эмиссии, что само по себе повышает мгновенный разброс продольных скоростей и толщину пучка. Таким образом, с переходом к более короткому фронту ускоряющего напряжения была продемонстрирована эффективность преобразования мощности электронного пучка в миллиметровое излучение наносекундной длительности в пределах 30–35%.

## Заключение

В рамках численной модели РЛОВ с резонансным рефлектором проанализировано влияние предварительной модуляции электронного пучка на пусковые условия генерации и эффективность энергообмена. Показано, что стартовый ток генератора, частота генерации и эффек-

тивность энергообмена зависят от положения резонансного рефлектора относительно ЗС. Данные эффекты нашли подтверждение в процессе экспериментального исследования генератора. На практике в сантиметровом диапазоне длин волн реализованы: эффективный (КПД 20–25%) режим генерации в слабом магнитном поле; высокоэффективный (КПД 40%) режим генерации в сильном магнитном поле: режим с расширенной полосой механической перестройки частоты генерации (9–11%); режим генерации мультигигаваттной РЛОВ с эффективностью 31%, пиковой мощностью 4.3 GW и длительностью микроволновых импульсов около 20 ns без применения специальных методов повышения электрической прочности ЗС. Продемонстрирован эффективный (КПД 30–35%) режим генерации РЛОВ на длине волны 8 mm в низком магнитном поле. Во всех перечисленных экспериментах обеспечивалось селективное возбуждение рабочей волны в ЗС с увеличенными поперечными размерами ( $D/\lambda \approx 1.3–1.5$ ).

Наблюдаемое отличие между максимальными расчетными и экспериментальными эффективностями генератора в низких магнитных полях связано со спецификой формирования электронного пучка в области вакуумного диода, где основную роль играет ограниченное число эмиссионных центров на катодной кромке. Повышение стабильности генерации и эффективности энергообмена в слабых магнитных полях достигается как за счет усиления декомпрессии магнитного потока, в котором формируется и транспортируется электронный пучок, так и с укорочением фронта импульса ускоряющего напряжения.

Дальнейшее повышение мощности и энергии микроволновых импульсов в эксперименте может быть реализовано за счет увеличения среднего диаметра ЗС при сохранении селективных свойств генератора. Однако в этой задаче, как и в дальнейшем наращивании эффективности генератора, основным препятствием является проблема нелинейной конкуренции и возбуждения незапланированных колебаний.

Авторы выражают благодарность коллективам отдела физической электроники ИСЭ СО РАН, лабораторий электронных ускорителей и импульсной техники ИЭФ УрО РАН за помощь при проведении экспериментальной части работ.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 06-08-00063а.

## Список литературы

- [1] Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 28. Вып. 4. С. 232.
- [2] Коровин С.Д., Полевин С.Д., Ройтман А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 8. С. 63–67.
- [3] Иванов В.С., Кременцов С.И., Куценко В.А. и др. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 5. С. 970–975.
- [4] Быков Н.М., Губанов В.П., Гунин А.В. и др. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 5. С. 32–38.
- [5] Кицанов С.А., Климов А.И., Коровин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 6. С. 87–93.
- [6] Гунин А.В., Кицанов С.А., Климов А.И. и др. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 84–88.
- [7] Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Ковалев Н.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 11. С. 102–105.
- [8] Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 10. С. 43–47.
- [9] Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189–1196.
- [10] Ковалев Н.Ф., Петрухина В.И., Сморгонский А.В. // РиЭ. 1975. Т. 20. № 7. С. 1547.
- [11] Коровин С.Д., Месяц Г.А., Пегель И.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 6. С. 27–36.
- [12] Тараканов В.П. Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003. С. 456.
- [13] Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Samsonov S.V. // Int. J. Infrared Mill. 1995. Vol. 16. N 4. P. 745.
- [14] Коровин С.Д., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 10. С. 17–23.
- [15] Бугаев С.П., Ильин В.И., Кошелев В.И. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 5–75.
- [16] Коровин С.Д., Ростов В.В. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 21–30.
- [17] Кицанов С.А., Коровин С.Д., Климов А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 15. С. 1–7.
- [18] Климов А.И., Куркан И.К., Полевин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 24. С. 53.
- [19] Климов А.И., Куркан И.К., Полевин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 6. С. 23–60.
- [20] Yalandin M.I., Shpak V.G., Rostov V.V. // Special Issue on 14<sup>th</sup> Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia, 2006. P. 450–453.