

УДК 621.385.623

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР 8-МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН НА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЛАМПАХ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ СО СДВИНУТЫМИ ЧАСТОТАМИ

М. И. Яландин^{*1}, *К. А. Шарыпов*¹, *М. С. Педос*¹, *И. В. Романченко*², *В. В. Ростов*²,
*С. Н. Ружин*¹, *М. Р. Ульмаскулов*¹, *В. Г. Шпак*¹, *С. А. Шунайлов*¹

¹ Институт электрофизики Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург;

² Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, г. Томск, Россия

Выполнены эксперименты по суммированию в свободном пространстве линейно поляризованных гауссовых волновых пучков от двух и четырёх синхронно работающих наносекундных релятивистских ламп обратной волны 8-миллиметрового диапазона длин волн с мощностями около 200 МВт при контролируемом смещении частот генераторов. В одном из каналов смещение частоты примерно на 0,5 % было эквивалентно запаздыванию фазы на период высокочастотного заполнения импульса. В двухканальном варианте установки получен полный цикл биений в течение импульса с квадратичным (по числу источников) увеличением плотности потока мощности в интерференционном максимуме интегральной диаграммы направленности. Для четырёх каналов продемонстрировано диагональное смещение лепестков диаграммы направленности.

ВВЕДЕНИЕ

Релятивистская лампа обратной волны (ЛОВ), как наиболее адаптивный к изменению параметров пучка автогенератор [1], сыграла заметную роль в развитии техники генерирования мощных микроволновых импульсов с наносекундной длительностью. Эта техника развивалась сразу по нескольким направлениям, связанными с задачами повышения коэффициента полезного действия в сильных и слабых (ниже значения, соответствующего циклотронному резонансу [2]) магнитных полях и создания макетов источников с высокой частотой повторения импульсов (до 3,5 кГц [3]). Переход к ЛОВ с протяжёнными замедляющими структурами расширил возможности нестационарной генерации гигаваттных микроволновых импульсов на основе сильноточных электронных пучков с наносекундной длительностью благодаря использованию режима сверхизлучения [4–7]. Кроме того, надо упомянуть и развитие радиотехнических методов увеличения импульсной мощности в микроволновых компрессорах [8, 9], а также в волноводных структурах с сильной частотной дисперсией и сжатием частотно-модулированных сверхвысокочастотных (СВЧ) импульсов [10]. Новые перспективы использования ЛОВ с наносекундным диапазоном длительности генерируемых импульсов открылись благодаря ударному возбуждению колебаний с фиксированной фазовой структурой [11, 12]. Как полагают авторы работ [12, 13], стабильность фазы от импульса к импульсу имеет место в условиях превышения шумовым сигналом, определяемым коротким фронтом тока, некогерентных шумов в электронном пучке. В этом случае фаза высокочастотного тока задана моментом времени, когда скорость нарастания тока максимальна (при условии, которое, как правило, выполняется, что электроны уже обладают достаточной кинетической энергией [14]). Такой подход позволил осуществить когерентное сложение полей микроволновых генераторов с квадратичным (по числу каналов) увеличением потока мощности в основном лепестке диаграммы направленности [14–18].

* yalandin@iep.uran.ru

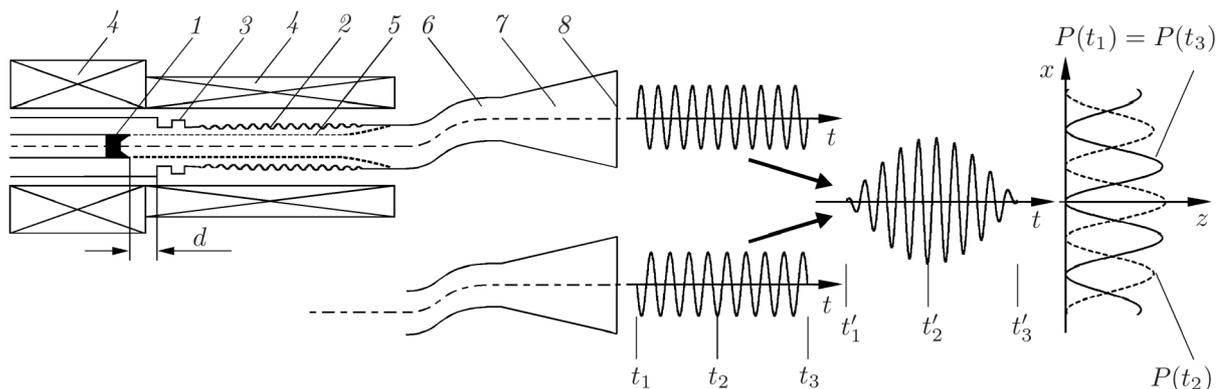


Рис. 1. Схема релятивистской ЛОВ и пояснение к эксперименту по суммированию излучения от двух генераторов со сдвинутыми частотами: 1 — графитовый катод, 2 — замедляющая структура, 3 — резонансный рефлектор, 4 — импульсный соленоид, 5 — электронный пучок, 6 — преобразователь моды $TM_{0,1}$ в $TE_{1,1}$, 7 — рупорная антенна, 8 — вакуумное окно

В отличие от классических фазированных антенных решёток, питаемых элементами-усилителями с общим задающим сигналом, когерентное суммирование полей стало возможным для многоканальных электродинамически не связанных автогенераторов в результате выполнения требований к длительности фронта импульсного напряжения, идентичности систем и расщепления импульсов питания [14]. Возможность электронного сканирования диаграммы направленности в пространстве от импульса к импульсу реализована за счёт управляемой задержки фронтов ускоряющего напряжения в высоковольтных линиях-обострителях [19]. Данная работа посвящена изучению возможности быстрого сканирования волновым пучком определённой области пространства в течение одного импульса. Этого можно достичь в режиме биения суммируемых СВЧ импульсов со сдвинутыми частотами. В этом случае диаграмма направленности в дальней зоне может варьироваться при изменении режима сложения полей от синфазного до противофазного пределов. Это поясняется на рис. 1 для двух источников с одним циклом биений. Описываемые далее эксперименты реализованы на основе использования многоканальных релятивистских ЛОВ 8-миллиметрового диапазона длин волн с мощностью излучения каждого генератора около 200 МВт [14].

1. ВАРИАЦИЯ ЧАСТОТЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ

Как известно, в релятивистской ЛОВ можно перестроить частоту генерации в небольших относительных пределах (около 1%) изменением энергии частиц (т. е. ускоряющего напряжения U_c) приблизительно на 10÷20%, если $U_c \approx 300$ кВ. В таких случаях рабочая точка на дисперсионной характеристике замедляющей структуры должна быть достаточно удалена от границ полосы пропускания, а отражения от коллекторного края не должны быть существенными. Для относительно большой перестройки частоты, например на 5% как в работах [10, 20], был применён оригинальный метод электронной перестройки частоты ЛОВ диапазона 10 ГГц за счёт разлёта плазмы в ускоряющем зазоре электронного диода. Развитие разряда по поверхности диэлектрической трубки в диоде по направлению от анодного сужения к катоду уменьшало зазор, приводило к снижению энергии ускоренных электронов и нарастанию тока пучка. В совокупности оба фактора обеспечивали требуемое смещение частоты ЛОВ [20].

В данной работе требовалось обеспечить сдвиг несущих частот в каналах около 0,5% за время импульса с длительностью около 200 периодов волны, чтобы разность фаз во временном

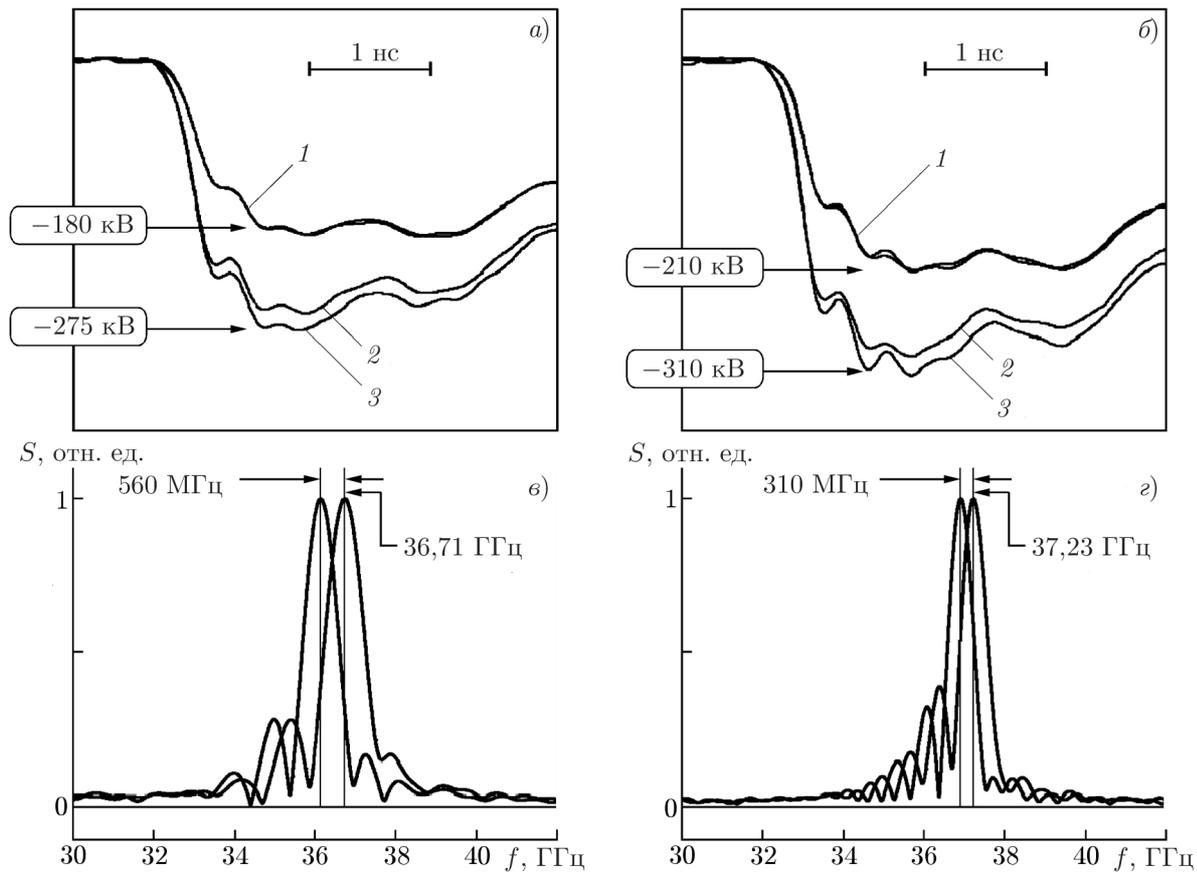


Рис. 2. Импульсы высоковольтного генератора U_{in} (кривые 1) с различными амплитудами и их трансформация в ускоряющий импульс напряжения на катоде U_c (2 – при $d = 3$ мм, 3 – при $d = 8$ мм), полученная методом динамической рефлектометрии (а, б). Вариация частотного спектра излучения релятивистской ЛОВ при изменении зазора d вакуумного диода от 3 до 8 мм (в, г)

представлении была близка к периоду высокочастотного заполнения (около 27 пс для частоты 37 ГГц).

В экспериментах был реализован квазистационарный режим работы ЛОВ (см. рис. 1) с фокусирующим импульсным магнитным полем 2 Тл, которое меньше величины, отвечающей циклотронному резонансу. На первом этапе были проведены спектральные измерения и анализ работы отдельной ЛОВ на основе ускорителя РАДАН-303 [21]. Особенностью экспериментов являлось применение сверхширокополосного осциллографа реального времени с полосой регистрации 59 ГГц и методики динамической рефлектометрии (ДР) [22] для детальной диагностики электронного диода. Эта методика была апробирована в экспериментах [23, 24]. После регистрации падающего (U_{in}) и отражённого (U_{ref}) импульсов напряжения двумя идентичными датчиками, разнесёнными в пространстве, путём обработки сигналов методом ДР определялись амплитуды и формы импульсов ускоряющего напряжения на катоде U_c и тока электронного пучка J_b с абсолютной временной привязкой.

В экспериментах на ускорителе РАДАН импульсы напряжения подавались по достаточно протяжённой передающей линии с волновым сопротивлением $(43,5 \pm 1)$ Ом на катод диода с большим (более 100 Ом) сопротивлением. Напряжение U_{in} могло варьироваться в широких пределах, однако мы сосредоточились на вариациях зазора диода d при двух фиксированных амплитудах U_{in} (стабильность не хуже 3%), равных -180 кВ (рис. 2а) и -210 кВ (рис. 2б). После обработки по

методике ДР эти импульсы трансформировались на катоде (см. огибающие функции напряжения U_c) для зазоров $d = 3$ и 8 мм. В силу сложной субнаносекундной динамики установления импеданса диода [24] формы огибающих функций напряжений U_{in} и U_c не являются подобными.

Анализ импульсов излучения проводился как во временной, так и в частотной областях. Основной являлась регистрация однократных радиоимпульсов с типичной частотой $f_0 = 37$ ГГц при 1,5-кратном запасе по полосе измерительной системы. Датчиком электрического поля волны являлась штыревая антенна на открытом торце СВЧ кабеля TMS-CLL-50141. Данные об изменении спектра (находимого быстрого преобразования Фурье) радиоимпульсов ЛОВ при вариации зазора диода $3 \div 8$ мм и двух вариантов импульсов напряжения U_{in} по амплитуде (рис. 2а и б) представлены на рис. 2в и г соответственно. Здесь и ниже мы приводим автонормированные спектральные функции. Как и следовало ожидать, при увеличенном ускоряющем напряжении (рис. 2б) рабочая точка ЛОВ смещается по направлению к π -виду дисперсионной зависимости и наблюдается рост частоты генерируемой рабочей волны $TM_{0,1}$, что видно по смещению максимумов спектраль-

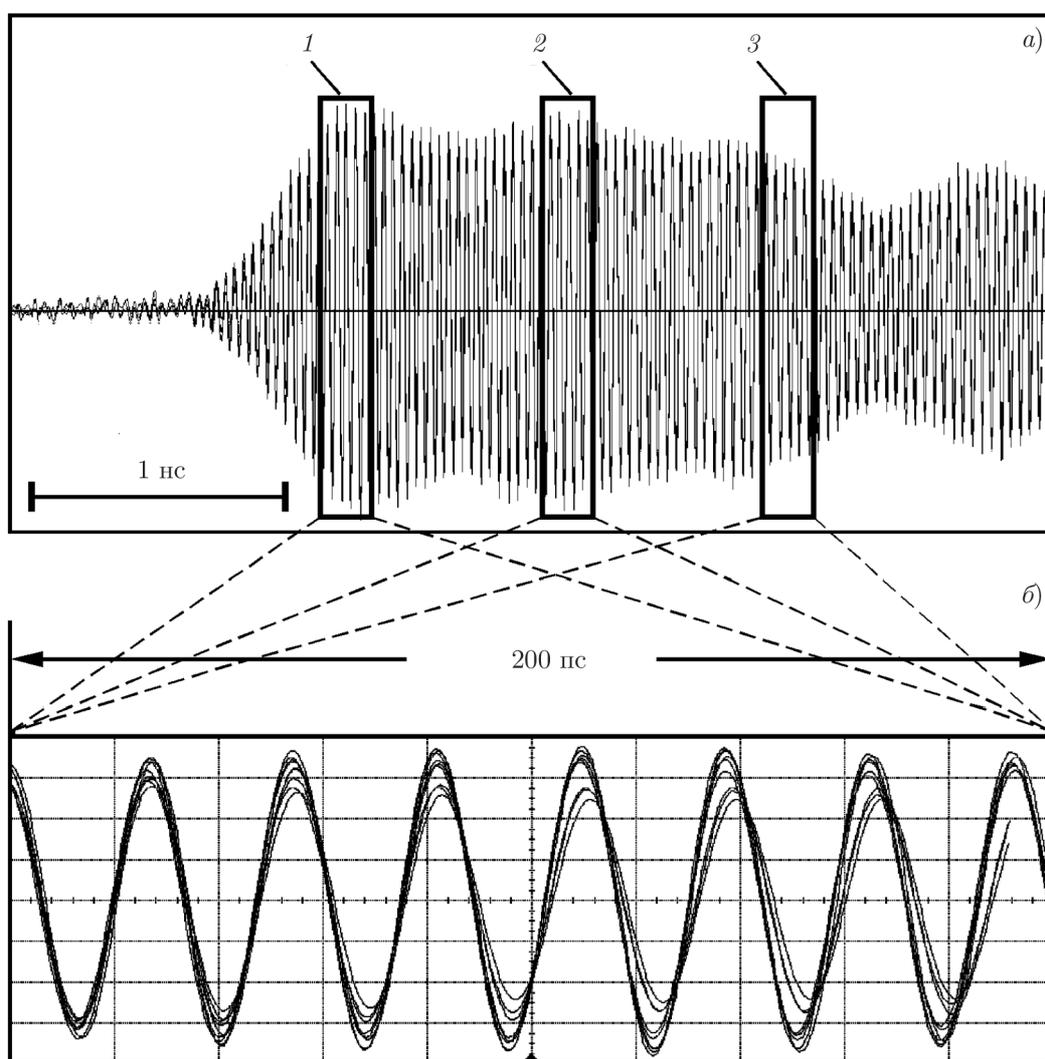


Рис. 3. Радиоимпульс наносекундной ЛОВ (а) и анализ стабильности его фазо-частотной структуры (б) во временных окнах 1–3 методом «лупы времени»

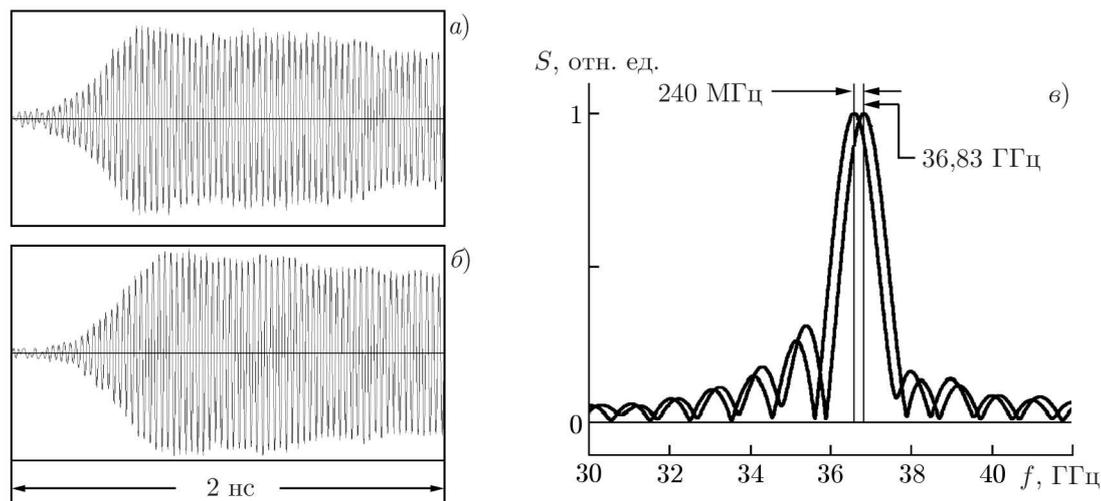


Рис. 4. Осциллограммы радиоимпульсов ЛОВ при вариации радиуса электронного пучка (а, б) и соответствующее смещение спектра излучения (в)

ных функций на рис. 2в и г. В силу релятивизма электронов перестройка центральной частоты при одинаковом изменении зазора диода снижается с ростом величины U_{in} .

Важно отметить, что мгновенная частота генерации смещается в течение импульса. Это представляло интерес для трёх временных интервалов, где энергия электронов (ускоряющее напряжение) меняется незначительно. Соответствующие данные показаны на рис. 3. Для первой реализации в трёх окнах (1–3) с длительностями 200 пс и в режиме «лупы времени» регистрировались участки высокочастотного заполнения радиоимпульса (рис. 3а). За счёт сдвига по времени (функция осциллографа «deskew») синусоиды из окон 2 и 3 совмещались по фазе с синусоидой из окна 1 в начале развёртки (рис. 3б). Для последующих реализаций операция сдвига фаз для окон 2 и 3 не применялась, но наложение сигналов воспроизводилось лишь с небольшими амплитудными вариациями и без фазовой подстройки. Это свидетельствует о воспроизводимости фазо-частотной структуры от импульса к импульсу. С учётом спада напряжения на заднем фронте ускоряющего импульса частота генерации в конце радиоимпульса (рис. 3а) снижается, что проявляется в «запаздывании» синусоиды (в окне 3) на фоне двух предыдущих. Нахождение с помощью быстрого преобразования Фурье оконных спектров для трёх последовательных окон с длительностью 1 нс (для ускоряющего импульса U_c , как на рис. 2а, и при зазоре диода $d = 8$ мм) позволило определить центральные частоты: 36,63; 36,43 и 35,49 ГГц.

Изменяя зазор диода d , мы осуществляем электронную перестройку частоты за счёт вариации $\delta\beta$ средней поступательной безразмерной скорости электронов (как обычно, скорость частиц нормирована на скорость света в вакууме). Этот сдвиг обязан изменению одновременно двух параметров, U_c и J_b , т. к. пропорционально току меняется и потенциал тонкого трубчатого пучка в дрейфовом пространстве: $\phi_b = (60/\beta)J_b \ln(r_0/r_b)$. Здесь r_0 — средний радиус замедляющей структуры, r_b — средний радиус пучка. В итоге изменяется кинетическая энергия частиц $W_e = e(U_c - \phi_b)$, где e — элементарный заряд. Если при неизменном зазоре d имеется возможность управлять величиной r_b , то появляется альтернативный способ тонкой подстройки частоты генерации. Для изменения радиуса пучка мы использовали метод, предложенный и апробированный в работе [25]. Он основан на различии времён диффузии импульсного магнитного поля в область ускоряющего промежутка через тонкую стальную стенку корпуса диода и внутрь медной стенки замедляющей структуры. Поэтому при смещении синхронизации пучка с импульсом соленоида можно корректировать профиль силовой линии и, следовательно, радиус пучка. На рис. 4 пред-

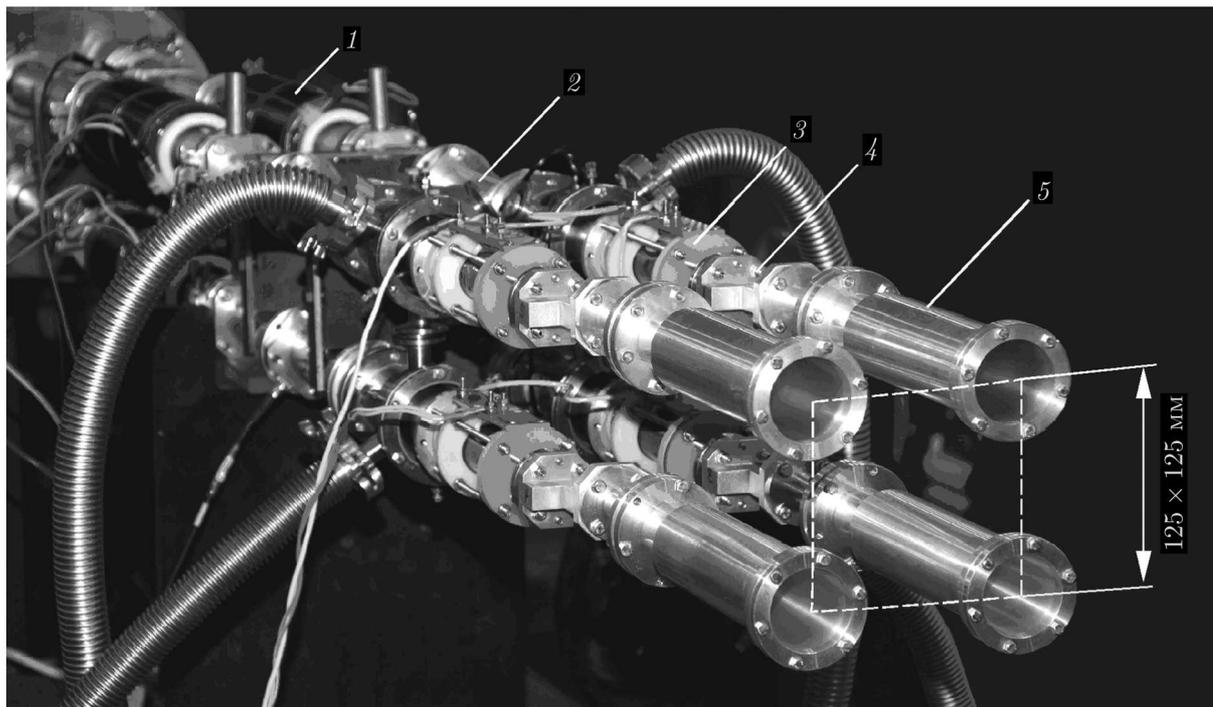


Рис. 5. Внешний вид 4-канальной наносекундной релятивистской ЛОВ: 1 — соленоид подмагничивания линии с ферритовым заполнением, 2 — передающая линия, 3 — релятивистская ЛОВ с импульсным соленоидом, 4 — преобразователь моды $TM_{0,1}$ в $TE_{1,1}$, 5 — рупорная антенна

ставлены радиоимпульсы и их полученные с помощью быстрого преобразования Фурье спектры при изменении величины r_b для двух вариантов синхронизации. Повышение потенциала пучка с уменьшением его радиуса, сопровождаемое сдвигом спектра как целого на 240 МГц, не привело к заметным изменениям формы огибающей функции радиоимпульса. Режиму генерации (см. рис. 4б), при котором диаметр пучка меньше, соответствует несколько возросшая задержка переходного процесса (около 0,1 нс) по сравнению со случаем, показанным на рис. 4а. При этом амплитуда сигнала примерно на 10% больше. Совмещение двух методов позволяет при необходимости сохранить мощность в каждом канале.

2. СУММИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В 2-КАНАЛЬНОМ ГЕНЕРАТОРЕ В РЕЖИМЕ БИЕНИЙ

Конфигурация экспериментальной установки приведена на рис. 5. Импульс напряжения формировался высоковольтным модулятором [26] на основе полупроводниковых прерывателей тока и дополнительного каскада сжатия импульса [27]. После расщепления на 4 канала идентичные импульсы обострялись индивидуальными гиромангнитными нелинейными линиями с насыщенным ферритом. Точность контролируемой задержки фронтов оценивается примерно в 1 пс. Мощность электрических импульсов, питающих электронные диоды, составляла около 800 МВт. По измерениям детектором и калориметром пиковая мощность наносекундных СВЧ импульсов (рис. 6) достигала примерно 200 МВт с квазигауссовым распределением диаграммы направленности за счёт применения преобразователей моды $TM_{0,1}$ в $TE_{1,1}$ [28]. Для двух- и четырёхканальных вариантов такой установки с близкими частотами ЛОВ, что соответствует приблизительно одинаковым значениям d , режим когерентного суммирования линейно поляризованных гауссовых волновых

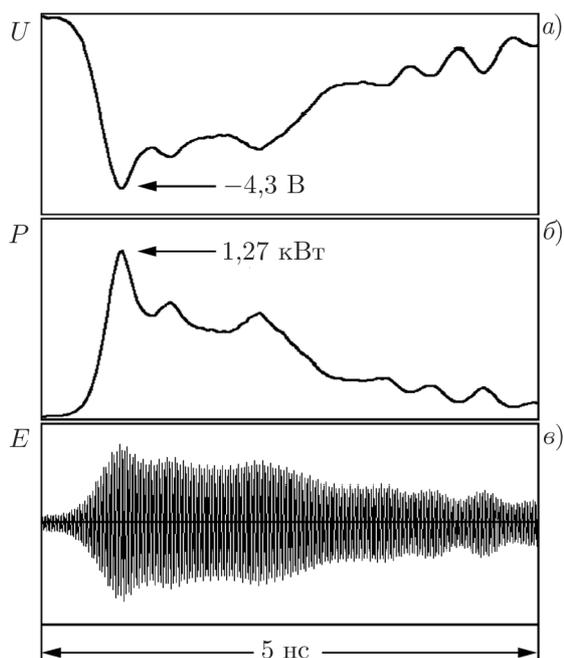


Рис. 6. Типичный импульс напряжения с детектора, регистрирующего сигнал одной из ЛОВ (а), тот же импульс с учётом вольт-ваттной калибровки детектора (б) и модель радиоимпульса с высокочастотным заполнением (в)

чётными (см. рис. 7). Ясно, что в результате сканирования максимумов диаграммы направленности в пространстве принимаемые сигналы сокращаются по длительности (примерно в 2 раза) и, кроме того, могут сдвигаться по времени, если дополнительно варьировать начальную разность фаз (в пределах от 0 до 2π).

В эксперименте фаза генерации в одном из каналов менялась от импульса к импульсу подобно тому, как это делалось ранее — за счёт вариации поля подмагничивания ферритовой передающей линии. Как видно из рис. 7, сигнал с детектора восстанавливал свою форму при росте задержки на один период. При расчёте (левый столбец на рис. 7) были получены близкие по форме огибающие функции напряжения с детектора. Видно, что для длительности СВЧ импульса по основанию около 5 нс и разности частот $\delta f = 200$ МГц осуществляется полный цикл биений, т. е. в точке регистрации плотность мощности суммарного излучения достигает максимума, затем приближается к нулю и далее снова увеличивается.

В двухканальном варианте с линейно поляризованными гауссовыми волновыми пучками по кадровые фотографии распределения потока мощности в некоторой плоскости, ортогональной главному направлению, за один цикл биений могли бы выглядеть так, как показано на расчётной диаграмме направленности (рис. 8а). Очевидно, что интегральное по времени распределение интенсивности (фото с экспозицией, большей длительности импульса) изображается сплошным пятном с максимумом в центре. Это означает, что в любой точке параксиальной области диаграммы направленности имеет место быстрое сканирование со смещением максимума плотности мощности.

пучков сохранялся в течение всей длительности импульсов [16, 18]. Этот факт подтверждался квадратичным (по числу источников) увеличением потока мощности излучения по сравнению с достигаемой при работе единичного генератора.

В эксперименте с двухканальным генератором полупроводниковый детектор регистрировал СВЧ сигналы по главному направлению антенной системы (база между излучающими рупорами равна 12,5 см) на расстоянии 7 м. Для каждой из двух ЛОВ импульсы с детектора были близки по форме (зависимость $U(t)$ на рис. 6а). С учётом нелинейной вольт-ваттной калибровки детектора можно восстановить форму детектированной мощности $P(t)$ (см. рис. 6б). При одновременной работе двух ЛОВ с одинаковой частотой мощность излучения, принимаемого в средней точке (на расстоянии 7 м), возрастает в 4 раза. Чтобы минимизировать эффекты нелинейности детектора, на следующем шаге между приёмной антенной и детектором был установлен волноводный аттенуатор с фиксированным четырёхкратным ослаблением. Далее вводилась разность $\delta f = 200$ МГц между частотами двух ЛОВ и проводилось сравнение принимаемых сигналов с рас-

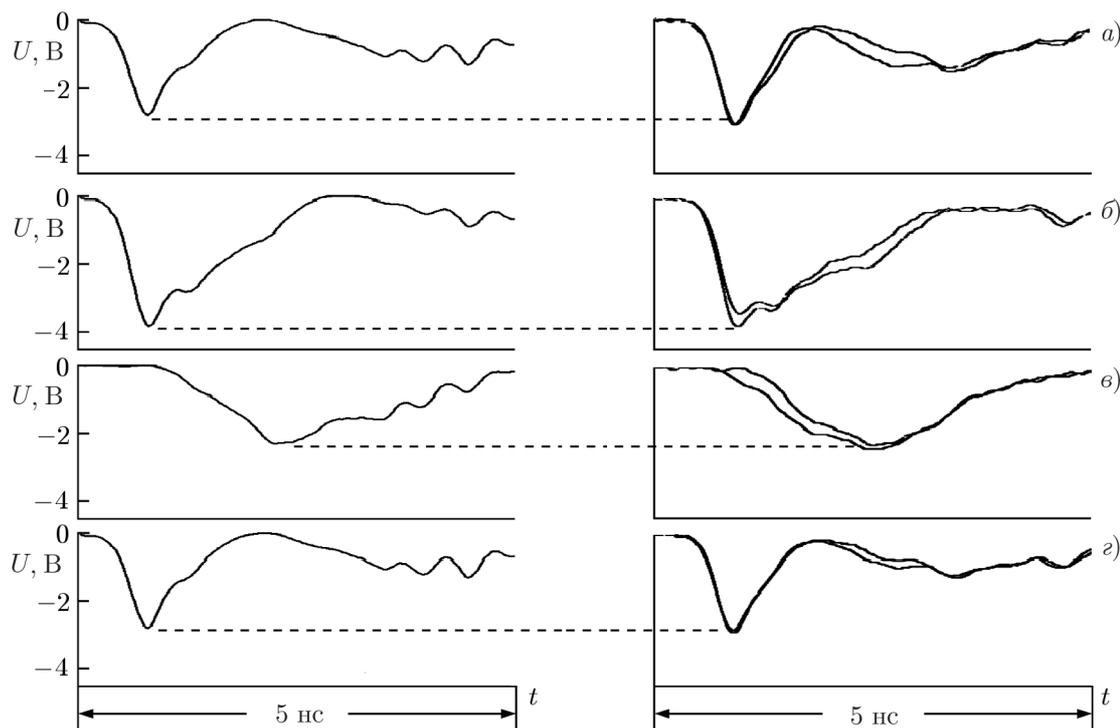


Рис. 7. Смоделированные (левый столбец) и экспериментальные (правый столбец) сигналы с детектора, получаемые при суммировании радиоимпульсов двух ЛОВ (аналогично рис. 6) со сдвинутыми частотами при вариации начальной фазы излучения в одном из каналов на 0 ; $0,4\pi$; $1,5\pi$ и 2π (панели *a*, *б*, *в* и *г* соответственно). При моделировании отстройка частот принята равной 200 МГц. Для эксперимента показаны по два импульса. Принимаемый детектором суммированный СВЧ сигнал предварительно ослаблен волноводным аттенуатором по мощности в четыре раза

3. СУММИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В 4-КАНАЛЬНОМ ГЕНЕРАТОРЕ В РЕЖИМЕ БИЕНИЙ

Наиболее наглядно выглядит результат суммирования импульсов в случае, когда сдвинута частота одной из четырёх ЛОВ в конфигурации, изображённой на рис. 5. В этом режиме согласно расчёту (см. рис. 8б) наблюдается возвратный диагональный «мазок» параксиальных интерференционных максимумов. Он представлен на экспериментальной фотографии индикаторного газоразрядного табло с открытым затвором (рис. 8в) в сравнении со случаем, когда сдвига частоты нет (см. рис. 8г).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для когерентного суммирования полей релятивистских электронных генераторов СВЧ излучения, как правило, несущественны начальные разности фаз. Более того, в условиях ограниченной длительности импульсов (порядка сотен периодов волны) допустим дрейф фазы и мгновенной частоты, если этот дрейф происходит схожим образом во всех каналах. Другими словами, удовлетворить требования взаимной фазовой стабильности намного проще, чем требования на аналогичный уровень фиксации фазы отдельного генератора [14], например по отношению к заданному моменту на фронте ускоряющего импульса. Как показывают эксперименты, важно обеспечить идентичность отклонений характеристик импульсов питания в каждом канале. Эта

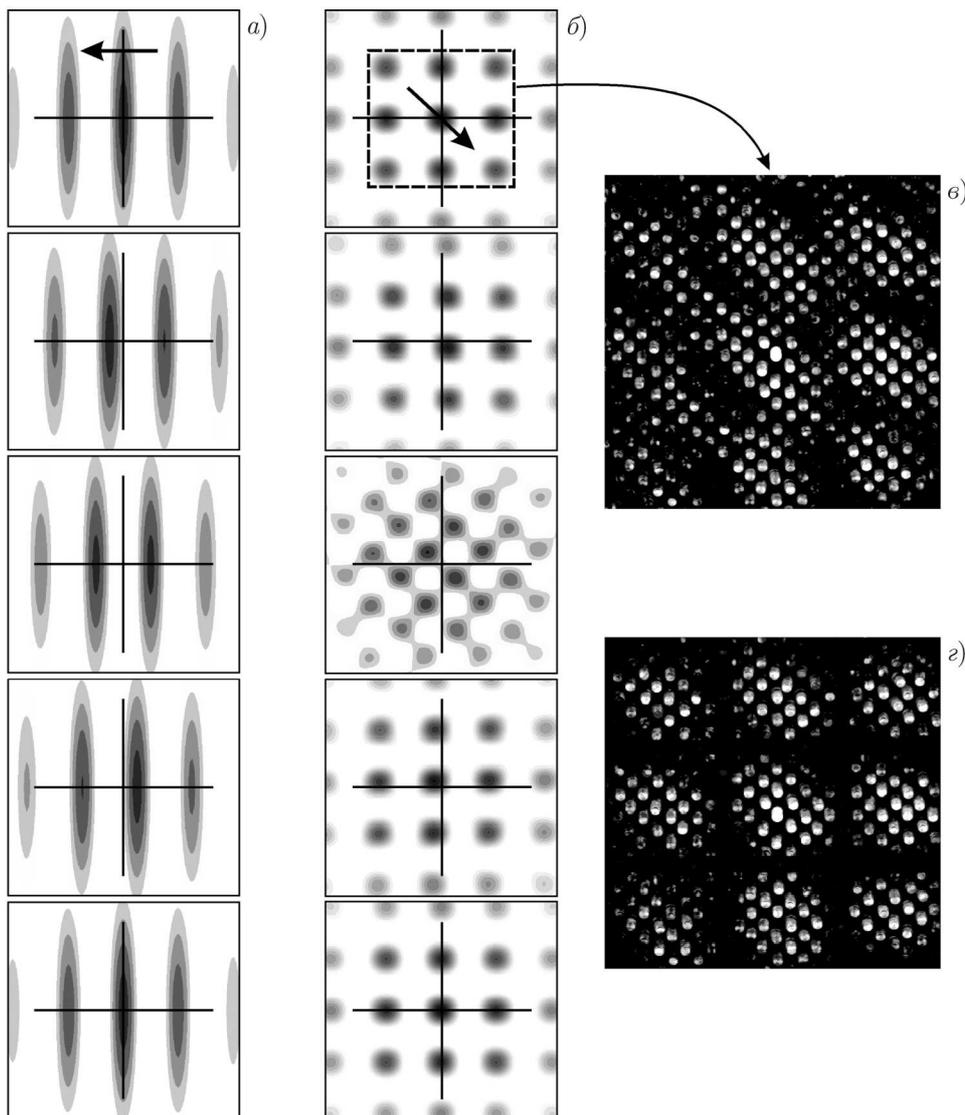


Рис. 8. Моделирование динамики распределения интенсивности интегрального волнового пучка в плоскости, ортогональной главному направлению антенной системы, при единичном цикле биений из-за сдвига частот в одном из каналов, в случаях двухканальной (а) и четырёхканальной (б) лампы обратной волны. Фотография с открытым затвором свечения индикаторного газоразрядного табло (в), соответствующая расчёту (б). Свечение табло при равных частотах генерации в четырёх каналах (г)

задача относительно просто решалась методом расщепления импульса питания.

В то же время, на наш взгляд, существует возможность использовать для питания релятивистских ЛОВ автономные высоковольтные генераторы, синхронизация которых должна осуществляться с субнаносекундной точностью. Например, это можно реализовать на основе управляемых разрядников с тригатронным, электронно-инжекционным или лазерным запуском.

Авторы признательны официальному представительству фирмы «Keysight Technologies» в России за предоставленную возможность тестовых измерений с использованием осциллограф-анализатора сигналов «Keysight DSAZ594A».

Работа выполнена при поддержке программ исследований ИЭФ УрО РАН (проекты 0389–2014–0005 и 15–17–2–47), а также РФФИ (проекты 15–08–02066 и 16–02–00029).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалёв Н. Ф., Петелин М. И., Райзер М. Д. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18, № 4. С. 232.
2. Куркан И. К., Ростов В. В., Тотъменинов Е. М. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24, № 10. С. 43.
3. Гришин Д. М., Губанов В. П., Коровин С. Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, № 19. С. 24.
4. Ginzburg N. S., Novozhilova N. Yu., Zotova I. V., et al. // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. P. 3297.
5. Ельчанинов А. А., Коровин С. Д., Ростов В. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77, № 6. С. 314.
6. Ельчанинов А. А., Коровин С. Д., Пегель И. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 8–9. С. 874.
7. Коровин С. Д., Месяц Г. А., Ростов В. В. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, № 3. С. 68.
8. Artemenko S. N., Samoilenko G. M., Shlapakovski A. S., et al. // J. of Appl. Phys. 2016. V. 119. Art. no. 014501.
9. Вихарев А. Л., Горбачёв А. М., Иванов О. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 8. С. 660.
10. Братман В. Л., Денисов Г. Г., Колганов Н. Г. и др. // Журн. техн. физ. 2011. Т. 81, № 2. С. 113.
11. Афанасьев К. В., Быков Н. М., Губанов В. П. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 21. С. 23.
12. Гришин Д. М., Любутин С. К., Месяц Г. А. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34, № 19. С. 14.
13. Rostov V. V., Elchaninov A. A., Romanchenko I. V., Yalandin M. I. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100, Art. no. 224102.
14. Ростов В. В., Ельчанинов А. А., Романченко И. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8–9. С. 525.
15. Ельчанинов А. А., Климов А. И., Ковальчук О. Б. и др. // ЖТФ. 2011. Т. 81, № 1. С. 125.
16. Яландин М. И., Шунайлов С. А., Ульмаскулов М. Р. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 20. С. 8.
17. Sharypov K. A., Elchaninov A. A., Mesyats G. A., et al // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103, Art. no. 134103.
18. Ginzburg N. S., Cross A. W., Golovanov A. A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115, Art. no. 114802.
19. Rostov V. V., Elchaninov A. A., Klimov A. I., et al // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41, No. 10-1. P. 2735.
20. Бесчаснов А. М., Братман В. Л., Колганов Н. Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 3. С. 96.
21. Шпак В. Г., Шунайлов С. А., Яландин М. И. и др. // ПТЭ. 1993. Т. 1. С. 149.
22. Sharypov K. A., Ul'maskulov M. R., Shpak V. G., et al. // Rev. Sci. Instr. 2014. V. 85, Art. no. 125104.
23. Yalandin M. I., Mesyats G. A., Rostov V. V., et al. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106, Art. no. 233504.
24. Belomyttsev S. Ya., Rostov V. V., Romanchenko I. V., et al. // J. Appl. Phys. 2016. V. 119, Art. no. 023304.
25. Boltachev G. S., Rostov V. V., Sharypov K. A., et al // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. V. 43, No. 8-3. P. 2613.
26. Rukin S. N. // Instr. Exp. Tech. 1999. V. 42, No. 4. P. 439.
27. Gusev A. I., Pedos M. S., Rukin S. N., et al // Rev. Sci. Instr. 2015. V. 86, Art. no. 114706.

28. Виноградов Д. В., Денисов Г. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33, № 6. С. 726.

Поступила в редакцию 26 апреля 2016 г.; принята в печать 25 июля 2016 г.

**A MULTI-CHANNEL Ka-BAND MICROWAVE GENERATOR
BASED ON FREQUENCY-SHIFTED RELATIVISTIC
BACKWARD-WAVE OSCILLATORS**

*M. I. Yalandin, K. A. Sharyпов, M. S. Pedos, I. V. Romanchenko, V. V. Rostov, S. N. Rukin,
M. R. Ul'maskulov, V. G. Shpak, and S. A. Shunailov*

Experiments on summation of linearly polarized Gaussian wave beams in free space from two and four synchronous nanosecond Ka-band relativistic backward wave oscillators (BWOs) having an output power of about 200 MW in the 8-mm wavelength range with controllably shifted oscillator frequencies have been performed. An about 0.5% frequency shift in one of the channels was equivalent to a one-period phase delay of the carrier frequency. In a two-channel option of the device, a full beat cycle was obtained for a pulse with quadratic (by the number of sources) enhancement of the power flux density at the interference maximum of the integral directional pattern (DP). In the case of a four-channel device, a diagonal displacement of the DP lobes has been demonstrated.