УДК 621.385.623

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ МОЩНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ФАЗЫ ВНЕШНИМ СИГНАЛОМ

 $K. A. \ Шарыпов^1, \ C. A. \ Шунайлов^1, \ H. \ C. \ \Gammaинзбург^2, \ И. B. \ Зотова^2, \ И. B. \ Романченко^3,$ $<math>B. \ B. \ Pocmos^3, \ M. \ P. \ Ульмаскулов^1, \ B. \ \Gamma. \ Шпак^1, \ M. \ И. \ Яландин^{1*}$

- ¹ Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург;
- 2 ФИЦ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;
- ³ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

В статье посредством расчётов и экспериментов развивается методика фиксации фазы генерации субгигаваттной нестационарной релятивистской лампы обратной волны (ЛОВ) 8-миллиметрового диапазона длин волн с использованием внешнего радиоимпульса, длительность которого значительно больше длительности импульса ведомой ЛОВ. Определён уровень мощности вводимого излучения (порядка 20 кВт), который обеспечил стабилизацию фазы с полным разбросом около 1,2 рад, — как при конкуренции с электромагнитным возмущением от крутого фронта тока пучка, так и в случае медленного нарастания тока, когда фиксации фазы в режиме автогенерации нет. Фиксация фазы реализуется при значительной разности частот внешнего радиоимпульса и ведомой ЛОВ (порядка 1 ГГц), т. е. отличается от режима усиления.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–5] продемонстрирована синфазная работа многоканальных сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов диапазонов длин волн 3 см и 8 мм с сильноточными электронными пучками. Интерес к этим исследованиям обусловлен формированием суммированного волнового пучка с интенсивностью I, возрастающей в интерференционном максимуме пропорционально квадрату числа каналов N. Эффект $I \propto N^2$ известен для фазированных антенных решёток, где излучаются усиленные радиоимпульсы, а их взаимная когерентность обеспечивается фазированием входных сигналов, получаемых делением мощности задающего СВЧ источника. Переход к решёткам из генераторов целесообразен, если требуется мощность единичного канала до 10^9 Вт и более, т. к. создание сильноточных электронных генераторов [6] проще, чем релятивистских усилителей [7–10].

Необходимым условием когерентного суммирования излучения многоканальных генераторов является стабилизация и управление фазой (фазировка) в каждом индивидуальном канале [11, 12]. Для этого в предыдущих экспериментах с релятивистскими лампами обратной волны (ЛОВ) было развито два подхода. При электронной фазировке начальная фаза генерации задаётся широкополосным сигналом (возмущением) от короткого фронта тока пучка [13, 14]. Альтернативный способ — электромагнитная фазировка — основан на использовании внешней затравки, например короткого радиоимпульса. Его мощность $P_{\rm s}$ должна обеспечивать конкуренцию с возможной электронной фазировкой, заведомо превышая шумы пучка. Согласно данным в работе [15] эти условия реализуются уже при $P_{\rm s}$ в десятки киловатт. Однако на нижнем пределе имеется высокая чувствительность к синхронизации ультракороткой (порядка 300 пс) затравки со встречно движущимся фронтом тока пучка близкой длительности [16]. Расстройка момента и места встречи фронта и затравочного сигнала в замедляющей структуре ЛОВ эквивалентна

^{*} yalandin@iep.uran.ru

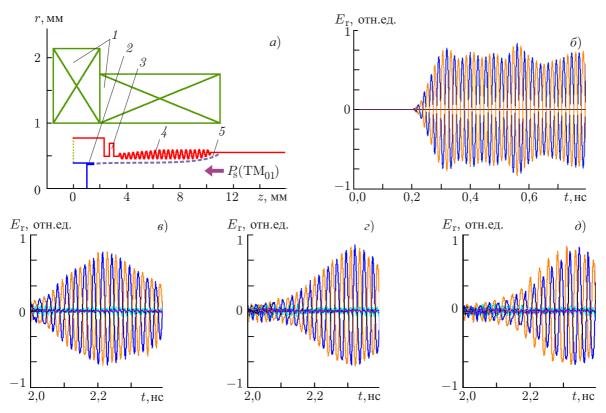


Рис. 1. Численное моделирование фиксации фазы нестационарной релятивистской ЛОВ внешним протяжённым радиоимпульсом: геометрия задачи (1— соленоид, 2— катод, 3— рефлектор, 4— замедляющая структура, 5— пучок (a); временная зависимость компоненты электрического поля противофазных (0 и π) затравочных радиоимпульсов с мощностью $P_{\rm s}$ (мода TM_{01}) (δ); радиоимпульсы-отклики ведомой ЛОВ с мощностью около 450 МВт при мощности $P_{\rm s}$, равной 170, 17 и 10 кВт соответственно (ϵ - δ)

недопустимому снижению мощности $P_{\rm s}$. Поэтому следующий этап исследований — это использование затравки увеличенной длительности. В численных экспериментах [17] для квазистационарной релятивистской ЛОВ частотного диапазона $f_0\approx 9.8$ ГГц подобный режим приводил к установлению фазы за время около 10 нс, причём частоты автогенерации ЛОВ и затравки $(f_{\rm s})$ отличались незначительно: $f_0-f_{\rm s}\approx 5$ МГц. В реальных экспериментах [18] с наносекундными (с длительностью более 20 нс) импульсами релятивистской ЛОВ $(f_0\approx 9.3$ ГГц; $\Delta f/f_0\approx 0.008$, где Δf — ширина спектра генерации ЛОВ по уровню 0,5) разность $f_0-f_{\rm s}\approx 20$ МГц приводила к фиксации фазы генерации относительно внешней затравки не менее чем за 15 нс в течение переходного процесса. При нестационарной генерации, типичной для описываемых ниже экспериментов, Δf достаточно велика $(\Delta f/f_0\approx 0.1)$, и это позволяет надеяться на фиксацию фазы внешним узкополосным радиоимпульсом, имеющим значительную отстройку от центральной частоты ЛОВ: $|f_0-f_{\rm s}|\approx \Delta f/2$. Отметим, что длинный радиоимпульс упрощает деление мощности задающего СВЧ источника для получения требуемой мощности $P_{\rm s}$ в нескольких ведомых каналах.

1. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Возможность фиксации фазы генерации нестационарной ЛОВ удлинённым затравочным радиоимпульсом и специфика такого режима исследовались с помощью численного моделирования

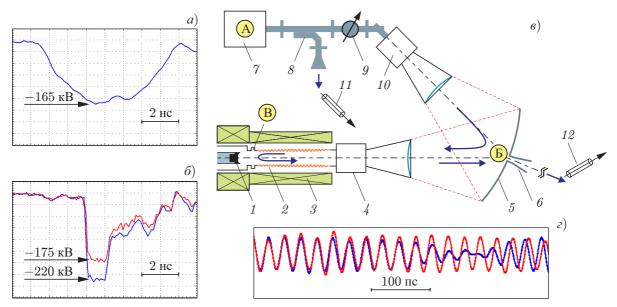


Рис. 2. Высоковольтные импульсы, формируемые драйвером РАДАН-303 (a) и индуктивно-ёмкостным звеном компрессии (б) на входе 44-омной передающей линии, питающей катод; (в) схема эксперимента (1- катод, 2- замедляющая система, 3- импульсный соленоид с магнитным полем около 2 Тл, 4- преобразователь волн $\mathrm{TE}_{11}\mathrm{-TM}_{01},\ 5-$ параболический рефлектор с отверстием связи, 6- излучающий рупор, 7- магнетрон, 8- направленный ответвитель, 9- волноводный аттенюатор, 10- волноводный преобразователь волн TE_{10} (прямоугольный волновод) — TE_{11} (круглый волновод), 11 и 12- приёмные антенны); сбой фазы генерации магнетрона импульсом ЛОВ (z)

методом крупных частиц (код КАРАТ [19]). Модель ЛОВ (см. рис. 1а) соответствовала релятивистскому нестационарному (сверхизлучательному) генератору с $f_0 \approx 37.5~\Gamma\Gamma$ ц, использованному ранее в экспериментах [15, 16, 20, 21] и в данной работе. На рис. 16 показаны два наложенных затравочных радиоимпульса (волна ТМ₀₁, вводимая навстречу пучку), фазы которых смещены на π . Мощности $P_{\rm s}$ противофазных радиоимпульсов одинаковы и варьировались в диапазоне от 2 МВт до 10 кВт. Согласно данным расчёта на рис. 16 и г фаза генерации ЛОВ также смещается на π при уменьшении величины $P_{\rm s}$ до 17 кВт. Дальнейшее падение мощности затравки до 10 кВт (см. рис. 1∂) приводит к потере корреляции фаз. Из рис. $1e-\partial$ видно, что увеличение мощности $P_{\rm s}$ определяет более раннее формирование пика излучения ЛОВ, что не противоречит результатам [16, 21], где затравка была короткой, а также выводам в работах [17, 22]. Для $P_{
m s} \geq 17$ кВт отмечена возможность управления фазой генерации ЛОВ при $f_0 - f_{
m s} = 2$ ГГц, что не меньше $\Delta f/2$. Иными словами, ЛОВ стартует с центральной частотой автономной генерации, и это принципиальное отличие от обычного режима усиления внешнего сигнала. Таким образом, численное моделирование показало целесообразность экспериментов при удлинённом затравочном радиоимпульсе с мощностью $P_{\rm s}$ в десятки киловатт, типичной для магнетронов диапазона длин волн 8 мм.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В экспериментах мощность ЛОВ 8-миллиметрового диапазона варьировалась в пределах $200 \div 500$ МВт в зависимости от параметров импульсов напряжения, подаваемых на взрывоэмиссионный катод вакуумного ускорительного диода. Применялись 5-наносекундные импульсы драйвера РАДАН-303 [23] (см. рис. 2a) или более короткие (порядка 1 нс) импульсы с регулируемой

амплитудой (см. рис. 26), формируемые дополнительным индуктивно-ёмкостным звеном компрессии энергии с выходным обостряющим разрядником [24]. Этот разрядник был неуправляемым, и статистика его срабатывания определяла амплитудный разброс выходного напряжения, который мог составлять более 10 % [21]. Когда требовалось изучение процессов с малой вариацией напряжения, применялся метод выборки с заданным диапазоном разброса амплитуд. В экспериментах по регистрации шумов пучка была необходима плавная перестройка длительности фронта напряжения, и для этого взамен индуктивно-ёмкостного звена использовалась гиромагнитная нелинейная передающая линия, обостряющая фронт [25].

Экспериментальная установка (см. рис. 2s) построена по схеме [26] с квазиоптическим вводом 100-наносекундного импульса магнетрона в пространство взаимодействия ЛОВ. С учётом данных в работе [16] коэффициент передачи мощности внешнего сигнала составлял около 0,75. В отличие от условий экспериментов [15, 16], из-за большой длительности сигнала магнетрона анализ корреляции фаз между затравкой и импульсом ЛОВ выполнялся на двухканальном осциллографе (частота 50 ГГц, 200 отсчётов/нс). Для регистрации радиосигналов использовались два датчика электрического поля в виде штыревых антенн на концах широкополосных кабелей. Синхронизация между импульсами ЛОВ и магнетроном выбиралась на интервале, меньшем времени прохождения фронта радиоимпульса-затравки по направлению A–B–B–B–A (см. рис. 2s), составлявшем около 20 нс. На этом интервале было корректно сравнивать фазы ЛОВ и затравки, поскольку последняя, возвращаясь в магнетрон после отражения от рефлектора ЛОВ (B–B–A), при малом ослаблении (развязке) волноводного аттенюатора инициировала сбой фазы магнетрона. Также учитывалось, что сбой (см. рис. 2s) происходил всегда, когда в магнетрон поступал мощный импульс ЛОВ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для анализа эффектов конкуренции электронной и электромагнитной фазировки ЛОВ проведён эксперимент по наблюдению электромагнитных шумов электронного пучка, для чего вместо замедляющей структуры устанавливалась однородная дрейфовая трубка. При крутом фронте ускоряющего импульса ($\mathrm{d}U/\mathrm{d}t\approx0.7~\mathrm{MB/hc}$, где $U-\mathrm{hanps}$ напряжение; рис. 3a) продемонстрировано наличие широкополосного всплеска излучения (см. рис. 3s). Этот радиосигнал имеет широкий спектр (см. рис. 3s), включающий частотную полосу ЛОВ, и опережает импульс генерации (см. рис. 3s) на $1~\mathrm{hc}$, что близко к времени его формирования (замыкания кольца обратной связи). Таким образом, наблюдалось возмущение в виде сигнала, привязанного к фронту пучка и задающего фазу ЛОВ с помощью механизма электронной фазировки. Более поздние шумы увеличенной амплитуды слабо влияют на установление фазы генерации в режиме черенковского электронноволнового взаимодействия. Они имеют спектральные максимумы преимущественно вне полосы генерации ЛОВ, частоты которых зависят от продольного магнитного поля и, вероятно, определяются спонтанным магнитотормозным излучением замагниченного трубчатого электронного пучка.

С уменьшением крутизны фронта напряжения (см. рис. 3θ) амплитуда лидирующей фракции шума резко снижается (см. рис. 3e). При таком падении мощности возмущения от фронта тока фиксация фазы генерации ЛОВ импульсом магнетрона оказалась вне конкуренции. Этот режим показан на рис. 4a, где, как и на приведённых ниже осциллограммах, использован режим накопления нескольких (обычно пяти) регистрируемых радиоимпульсов. Корреляция фаз ЛОВ и магнетрона имела место в том числе при нестабильной амплитуде напряжения, когда её полный разброс достигал 10%. В этом режиме радиоимпульс ЛОВ значительно смещался по времени (см. рис. 4θ) из-за вариации энергии и тока электронов, приводящей к изменению динамики его фор-

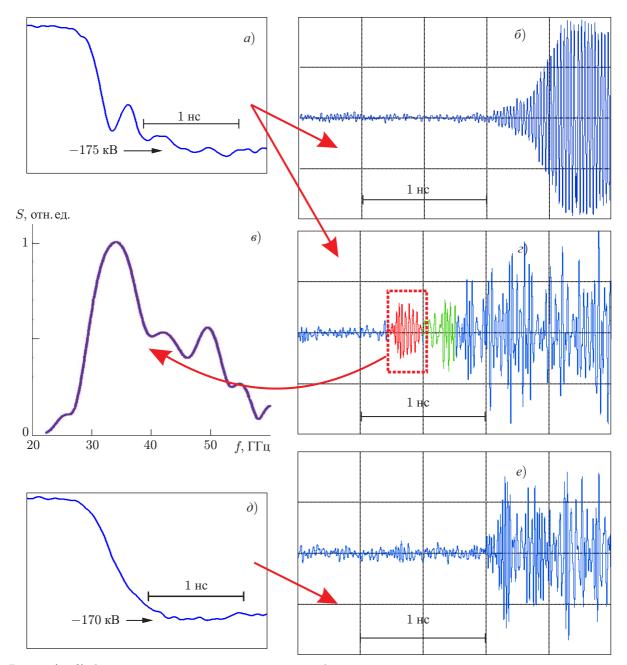


Рис. 3. (a, ∂) фронты высоковольтных импульсов, формируемых гиромагнитной линией в различных режимах обострения; (δ) радиоимпульс нестационарной ЛОВ с центральной частотой около 37,5 ГГц; (s, e) электромагнитные шумы пучка, регистрируемые антенной в случае фронтов a и d соответственно; (s) типичный спектр лидирующей фракции шумового сигнала s. Осциллограммы δ , s, e имеют абсолютную привязку по времени; амплитуды сигналов s и e взаимно нормированы

мирования (см., например, [27]). Чтобы продемонстрировать фиксацию фазы, радиоимпульсы магнетрона при каждом последующем включении фазировались относительно референтного за счёт смещения осциллограмм по временной шкале с использованием опций осциллографа «лупа времени» и deskew. При этом эквидистантно смещались наблюдаемые радиоимпульсы ЛОВ.

На рис. 5 демонстрируется корреляция фаз ЛОВ и сигнала магнетрона, когда его мощность варьировалась с помощью волноводного аттенюатора (9 на рис. 2a). Напомним, что мощность

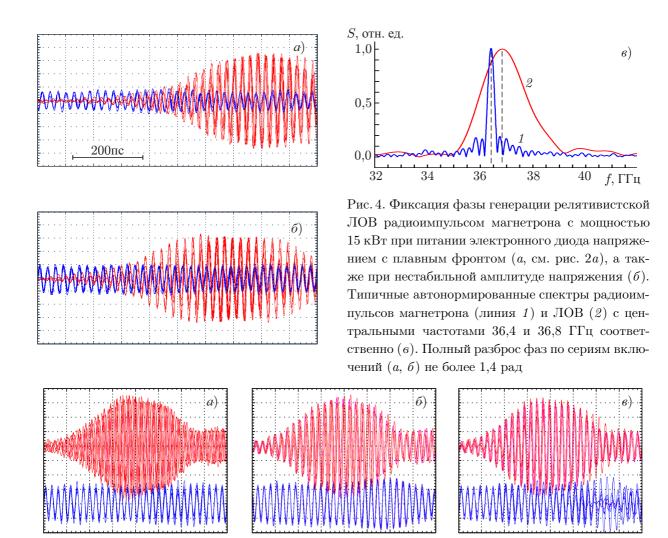
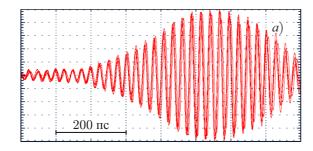
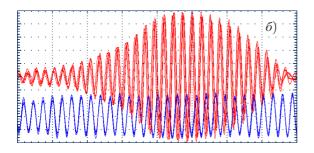


Рис. 5. Фаза генерации релятивистской ЛОВ относительно радиоимпульса магнетрона при использовании для питания вакуумного диода напряжения пониженной амплитуды, как на рис. 2a. Мощность вводимого в ЛОВ радиоимпульса 1 (a); 17 (b) и 34 кВт (b). Развёртка осциллограмм — 100 пс/деление. Полный разброс фаз по сериям включений: хаотический режим (a), 1,7 рад (b), 0,9 рад (b)

импульса при доставке в замедляющую структуру ЛОВ уменьшается в 0,75 раз. В эксперименте использовался импульс питания ЛОВ (см. рис. 26) пониженной амплитуды. Из-за сопутствующего снижения производной $\mathrm{d}U/\mathrm{d}t$ мощность возмущения от фронта пучка была недостаточной для электронной фиксации фазы, и поэтому в диапазоне малых мощностей затравки (до 1,5 кВт) фаза генерации ЛОВ с фронтом ускоряющего импульса не синхронизирована (см. рис. 5a). Устойчивая корреляция фаз наблюдалась начиная с мощности магнетрона около 22 кВт (см. рис. 56) и улучшалась при её максимальном значении порядка 45 кВт (см. рис. 5a). Таким образом, «порог» мощности затравки ($22 \times 0.75 \approx 17$ кВт) соответствует результатам численного моделирования (рис. 1), где она была в диапазоне $10 \div 17$ кВт. При максимальной мощности ($45 \times 0.75 \approx 34$ кВт) полный разброс синхронизации фаз оценивается примерно как 5 пс по временной шкале, или 1.2 рад.

Максимальная амплитуда напряжения питания ЛОВ (см. рис. 26), как и в работе [21], определяла величину $\mathrm{d}U/\mathrm{d}t$, достаточную для получения крутого фронта тока пучка и ассоциированно-





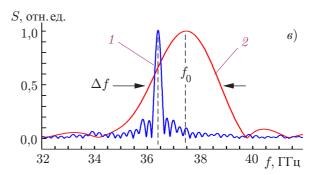


Рис. 6. Фиксация фазы генерации релятивистской ЛОВ затравочным сигналом от фронта тока электронного пучка при напряжении питания вакуумного диода с большой амплитудой, как на рис. 2a (a). Переход к механизму электромагнитной фиксации фазы радиоимпульсом магнетрона с мощностью вводимого в ЛОВ излучения 34 кВт (δ). Типичные автонормированные спектры радиоимпульсов магнетрона (1) и ЛОВ (2) с центральными частотами 36,4 и 37,5 ГГц соответственно (ϵ). Полный разброс фаз по сериям включений (ϵ) не более ϵ 1,2 рад

го с ним интенсивного возмущения. В этом случае в отсутствие сигнала магнетрона имела место электронная фазировка ЛОВ (см. рис. 6a). При включении магнетрона на максимальной мощности произошёл переход к электромагнитному режиму фиксации фазы (см. рис. 6b). Это означает, что мощность электромагнитного возмущения от фронта тока пучка, аналогичного выделенному пунктиром на рис. 3c, была меньше мощности внешнего затравочного сигнала. Отметим, что частота генерации ЛОВ в режимах на рис. 6a и b не изменилась и была выше частоты магнетрона на 1,1 Γ Гц. Это различие больше, чем на рис. 4 при пониженной амплитуде ускоряющего напряжения в силу известного свойства роста частоты генерации ЛОВ с увеличением энергии пучка.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численного моделирования и экспериментально показана возможность применения протяжённого затравочного радиосигнала для возбуждения генерации нестационарной релятивистской ЛОВ 8-миллиметрового диапазона длин волн с навязанной фазой. Определён необходимый для этого уровень мощности сигнала. Анализ развития шумов электронного пучка показал, что эффект лидирующего электромагнитного всплеска на фронте тока пучка может быть нивелирован магнетронным сигналом с мощностью в несколько десятков киловатт. Продемонстрировано, что ЛОВ возбуждается на частоте автономной генерации с отстройкой от частоты затравки примерно 1,1 ГГц, т. е. около 3 %.

Практический интерес представляет возможность фиксации, а значит, и управления фазой генерации при использовании ускоряющих импульсов с относительно протяжёнными наносекундными фронтами. Системы формирования таких импульсов существенно проще, чем в случае субнаносекундных фронтов. Есть основания полагать, что в квазистационарном (наносекундном) режиме генерации ЛОВ эффект фиксации фазы более протяжённым радиосигналом (длительность

десятки наносекунд) позволит применять для питания ускорительных диодов ЛОВ автономные высоковольтные генераторы. Их можно синхронизировать управляемыми искровыми коммутаторами с точностью порядка 1 нс.

Достигнуто снижение требований к точности синхронизации протяжённого внешнего затравочного радиоимпульса с сильноточными пучками релятивистских ЛОВ. Отмечаем также возможность использовать квазиоптические методы расщепления этого радиоимпульса на несколько каналов, например используя эффект Тальбота. Число синфазных каналов может быть большим, если в качестве задающего генератора применить мегаваттные СВЧ источники, например современные гирорезонансные приборы.

Работа выполнена при частичной поддержке Президиума РАН (программа 10) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 17–08–00046 и 18–08–00133). Авторы признательны официальному представительству фирмы Tektronix в России за предоставленную возможность тестовых измерений с использованием осциллографа модели DPS75004SX. Эксперименты проводились с применением оборудования Центра коллективного пользования ИЭФ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ельчанинов А. А., Климов А. И., Ковальчук О. Б. и др. // Журн. техн. физики. 2011. Т. 81, N 1. С. 125.
- 2. Sharypov K. A., Elchaninov A. A., Mesyats G. A., et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103, Art. no. 134103.
- 3. Rostov V. V., Elchaninov A. A., Klimov A. I., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41, No. 10. P. 2735.
- 4. Ginzburg N.S., Cross A.W., Golovanov A.A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115, Art. no. 114802.
- 5. Ginzburg N.S., Cross A.W., Golovanov A.A., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. V. 44, No. 4. P. 377.
- 6. Gold S. H. Nusinovich G. S. // Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68, No. 11. P. 3945.
- 7. Gold S. H., Hardesty D. L., Kinkead A. K., et al. // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 52, No. 14. P. 1218.
- 8. Orzechowski T. J., Anderson B. R., Fawley W. M., et al. // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54, No. 9. P. 889.
- 9. Bratman V. L., Cross A. W., Denisov G. G., et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84, No. 12. P. 2746.
- 10. Xiao R. Z., Chen C. H., Song W., et al. // J. Appl. Phys. 2011. V. 110, No. 1. Art. no. 013301.
- 11. Афанасьев К. В., Быков Н. М., Губанов В. П. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 21. С. 23.
- 12. Eltchaninov A. A., Korovin S. D., Mesyats G. A., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, No. 3. P. 1093.
- 13. Rostov V. V., Elchaninov A. A., Romanchenko I. V., Yalandin M. I. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100, No. 22. 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. Mesyats G. A., Ginzburg N. S., Golovanov A. A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 118, No. 26. Art. no. 264801.
- Ginzburg N. S., Golovanov A. A., Romanchenko I. V., et al. // J. Appl. Phys. 2018. V. 124, No. 12. Art. no. 123303.
- 17. Song W., Sun J., Shao H., et al. // J. Appl. Phys., 2012. V. 111, No. 2. Art. no. 023302.
- 18. Teng Y., Song W., Sun J., et al. // J. Appl. Phys., 2012. V. 111, No. 4. Art. no. 043303.

- 19. Tarakanov V. P. User's Manual for Code KARAT. Springfield: Berkeley Research Associates, Inc., 1992. 127 p.
- 20. Rostov V. V., Romanchenko I. V., Elchaninov A. A., et al. // Phys. Plasmas. 2016. V. 23, No. 8. Art. no. 083111.
- 21. Sharypov K. A., Rostov V. V., Sadykova A. G., et al. // Appl. Phys. Lett. 2018.V. 113, No. 22. Art. no. 223502.
- 22. Абубакиров Э. Б., Денисенко А. Н., Конюшков А. П. и др. // Изв. вузов Радиофизика. 2014. Т. 57, № 5. С. 413.
- 23. Шпак В. Г., Шунайлов С. А., Яландин М. И. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1993. № 1. С. 149.
- 24. Коровин С. Д., Литвинов Е. А., Месяц Г. А. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, № 19. С. 30.
- 25. Romanchenko I. V., Rostov V. V., Gubanov V. P., et al. // Rev. Sci. Instr. 2012. V. 83, No. 7. Art. no. 074705.
- 26. Реутова А. Г., Ульмаскулов М. Р., Шарыпов А. К. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82, № 5. С. 295.
- 27. Гинзбург Н. С., Кузнецов С. П., Федосеева Т. Н. // Изв. вузов Радиофизика. 1978. Т. 21, № 7. С. 1037.

Поступила в редакцию 19 апреля 2019 г.; принята в печать 18 июля 2019 г.

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF HIGH-POWER MICROWAVE OSCILLATORS WITH PHASE LOCKING BY AN EXTERNAL SIGNAL

K. A. Sharypov, S. A. Shunailov, N. S. Ginzburg, I. V. Zotova, I. V. Romanchenko, V. V. Rostov, M. R. Ulmasculov, V. G. Shpak, and M. I. Yalandin

By simulations and experiments we develop a method for generation phase locking of a K_a-band subgigawatt nonstationary relativistic backward-wave oscillator (BWO) with an external radio pulse, the duration of which is considerably greater than the pulse duration of a driven BWO. The level of input power (about 20 kW), which provided phase locking with a total spread of about 1.2 rad, is determined both for the case of competition with an electromagnetic disturbance from a steep front of the beam current and the case of a slow current rise without phase locking in the self-excitation mode. The phase locking effect is achieved with a significant difference in the frequencies of the external radio pulse and driven BWO (about 1 GHz) and hence differs from the amplification mode.