

09;10;12

# Микроволновый источник мультигигаваттной пиковой мощности на основе комбинации релятивистской лампы обратной волны и компрессора

© В.Л. Братман, Г.Г. Денисов, Н.Г. Колганов, С.В. Мишакин, С.В. Самсонов, Д.И. Соболев

Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: mishakin2006@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 29 июня 2010 г.)

Эффект пассивной компрессии частотно-модулированных (ЧМ) импульсов в диспергирующих средах (ДС) использован для повышения пиковой мощности микроволнового излучения до мультигигаваттного уровня. В качестве ДС использован волновод с винтовой гофрировкой поверхности, а в качестве источника ЧМ-импульса — релятивистская лампа обратной волны диапазона 3 см со спадающим в течение импульса ускоряющим напряжением. На ускорителе „СИНУС-6“ продемонстрирована компрессия импульса до длительности 2.2 ns (по полувывоте), сопровождавшаяся увеличением пиковой мощности в 4.5 раза до величины 3.2 GW.

## Введение

Одной из актуальных задач вакуумной электроники является создание СВЧ-источников гигаваттной и мультигигаваттной импульсной мощности [1]. Очень высокий уровень мощности — 15 и 3 GW на длинах волн 3 и 1 см соответственно — был зарегистрирован более 20 лет назад в экспериментах, проведенных на уникальной установке при использовании сильноточного ускорителя электронов с довольно высокой энергией частиц до 2 MeV [2]. Достижение мощности такого уровня при меньшей энергии частиц могло бы значительно повысить привлекательность подобных генераторов и расширить круг их приложений. Поэтому в ряде работ разрабатываются мощные СВЧ-источники с существенно менее интенсивными электронными пучками — с энергией частиц до 400–600 keV. Подобные пучки с током до 5–10 kA и длительностью импульсов до 20–40 ns могут быть получены на сравнительно компактных и доступных для лабораторных исследований высоковольтных установках. На использовании подобных пучков основаны, в частности, активно разрабатываемые генераторы, в которых за счет эффектов сверхизлучения пиковое значение выходной мощности заметно превышает мощность электронного пучка. Таким способом в сверхизлучательных лампах обратной волны (ЛОВ) получены мощности 3 и 1.1 GW на длинах волн 3 см и 8 mm соответственно [3,4]. В работах [5–7] был также предложен и исследован альтернативный метод, основанный на генерации импульсов с плавно изменяющейся во времени частотой и последующей их компрессии в диспергирующей среде, развитию которого и посвящена данная работа.

При малых потерях коэффициент компрессии по мощности для частотно-модулированного импульса примерно равен произведению длительности входного импульса на интервал частотной модуляции [8,9]. Так, в диапазоне 3 см импульс длительностью 20–40 ns с модуляцией

частоты в полосе 5% (0.5 GHz) может быть в идеальном случае сжат по длительности и соответственно увеличен по мощности в 10–20 раз. При этом для получения мультигигаваттной выходной мощности в качестве источника частотно-модулированных (ЧМ) импульсов достаточно использовать релятивистский электронный СВЧ-генератор или усилитель с мощностью в несколько сотен мегаватт. Наиболее освоенными источниками такого уровня мощности в настоящее время являются релятивистские лампы обратной волны [10–12], близкие по принципу действия слаборелятивистским ЛОВ.

Хорошо известно, что в слаборелятивистских ЛОВ частота излучения плавно и быстро изменяется в широких пределах при плавном изменении напряжения. Это свойство частично сохраняется и при умеренно релятивистских энергиях электронов, что позволяет плавно изменять частоту генерации в течение наносекундного импульса за счет изменения ускоряющего напряжения. Для компрессии таких модулированных по частоте мощных СВЧ-импульсов удобно использовать дисперсионную систему в виде круглого металлического волновода с винтовой гофрировкой внутренней поверхности [5,13]. При оптимальном выборе параметров гофрировки волновода групповая скорость одной из его нормальных волн обладает сильной зависимостью от частоты, что является необходимым условием для компрессии.

В настоящей работе представлены новые результаты проводимых в ИПФ РАН экспериментальных исследований по генерации и компрессии частотно-модулированных импульсов в системах, состоящих из релятивистских ЛОВ и винтовых компрессоров.

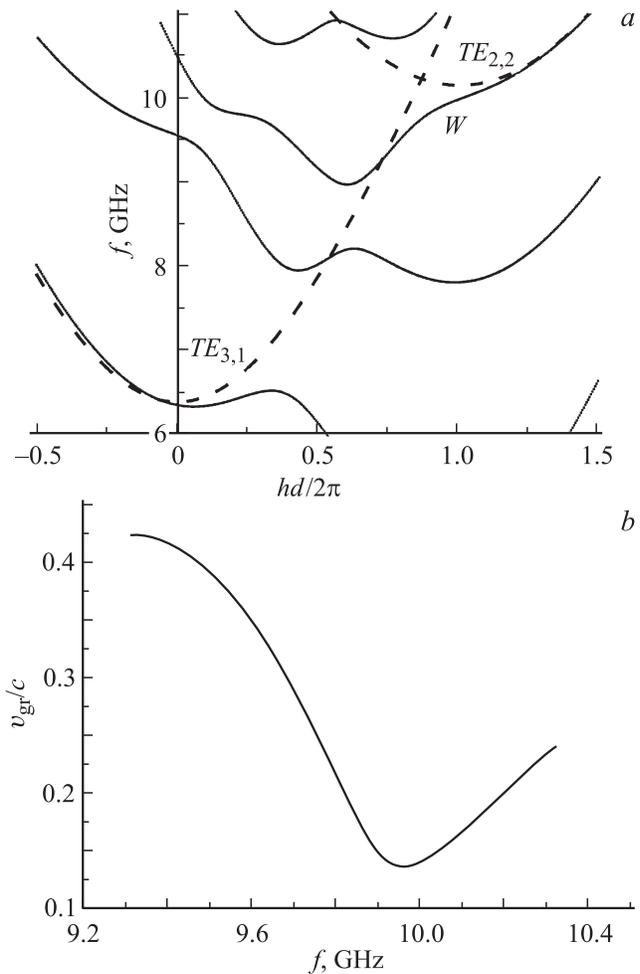
## 1. Компрессор с винтовой гофрировкой поверхности

При выполнении соответствующих условий синхронизма винтовая гофрировка стенки способна обеспечить

эффективную связь двух циркулярно-поляризованных парциальных волн гладкого волновода. При этом дисперсионная характеристика одной из образующихся нормальных волн является результатом плавной трансформации характеристики одной парциальной волны в другую. Необходимая для компрессии частотно-модулированных импульсов сильная зависимость групповой скорости нормальной волны от частоты достигается, когда групповые скорости парциальных волн сильно отличаются друг от друга. Это реализуется, в частности, когда частота одной из волн близка, а другой — далека по отношению к их критическим частотам в гладком волноводе. Дисперсия нормальной волны такого винтового волновода в значительной степени определяется параметрами гофрировки, что делает возможным ее эффективную оптимизацию для целей компрессии.

При компрессии импульсов до высокого уровня мощности необходимо в широкой полосе частот обеспечить малые отражения излучения в сторону генератора и отсутствие пробойных явлений. Проблема отражений в значительной степени решается использованием винтовой гофрировки и циркулярно-поляризованных рабочих волн. В этом случае в дисперсии нормальной волны можно избежать появления областей с нулевой и отрицательной групповой скоростью (в отсутствие гофрировки или при наличии аксиально-симметричной гофрировки сильная дисперсия волн имеет место только вблизи квазикритических частот или вблизи брэгговских полос запираания). Не менее серьезную опасность даже при достаточно высоком вакууме внутри компрессора представляет СВЧ-пробой, вызываемый взрывной эмиссией электронов с поверхности металла под действием электрического поля волны. Наиболее слабым для пробоя участком компрессора является сам винтовой волновод на частоте, при которой групповая скорость его рабочей волны минимальна.

Для обеспечения мультитигваттного уровня мощности в ИПФ РАН разработана новая разновидность компрессора в виде волновода с пятизаходной гофрировкой, связывающей квазикритическую волну  $TE_{2,2}$  и бегущую волну  $TE_{3,1}$  гладкого волновода с противоположными направлениями вращения (рис. 1, *a*). Ввод и вывод излучения осуществлялся бегущей циркулярно-поляризованной волной  $TE_{3,1}$ , адиабатически трансформирующейся сначала в нормальную рабочую моду винтового волновода, а затем обратно — при прохождении участков сходим с плавным нарастанием и спаданием амплитуды гофрировки. Использование в качестве квазикритической сравнительно высокой моды  $TE_{2,2}$  с радиальным индексом 2 позволяет обеспечить достаточно равномерное распределение электрического поля рабочей волны по поперечному сечению волновода с максимумом не на стенке, что существенно повышает электропрочность структуры. Противоположное направление вращения взаимодействующих парциальных волн, высокий азимутальный индекс бегущей волны  $TE_{3,1}$  и использование гофрировки с азимутальным индексом 5



**Рис. 1.** Диаграмма Бриллюэна в волноводе с винтовой гофрировкой (*a*) и зависимость от частоты групповой скорости рабочей нормальной волны винтового волновода (*b*).

обеспечивают высокий коэффициент связи рабочей пары мод при сравнительно неглубокой гофрировке, что повышает селективность данной конфигурации.

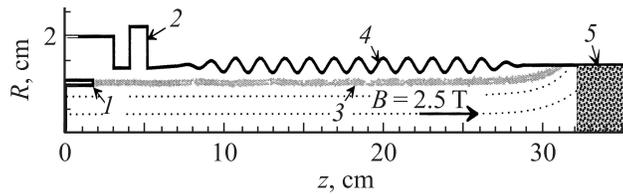
В цилиндрических координатах поверхность используемого волновода имеет следующий вид:

$$r(\varphi, z) = 31.5 + 2.7 \sin(2\pi z/32.4 - 5\varphi),$$

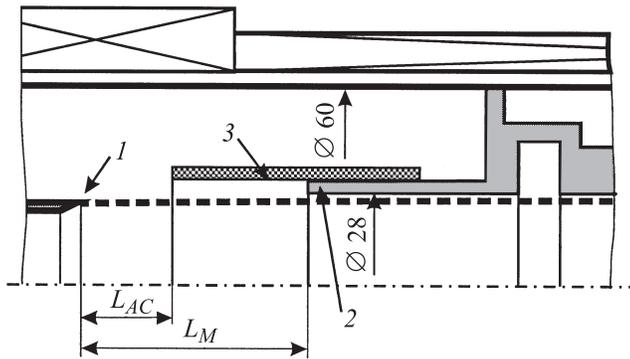
где размеры указаны в миллиметрах. Для компрессии импульсов наиболее подходит участок дисперсионной кривой от 9.4 до 9.95 GHz (рис. 1, *b*), в котором групповая скорость нормальной рабочей волны имеет отрицательную производную. В указанном интервале частот входной импульс должен иметь отрицательную частотную модуляцию.

## 2. Релятивистская ЛОВ

Как было отмечено во Введении, широкополосная перестройка частоты генерации ЛОВ возможна при изменении ускоряющего напряжения в катод-анодном промежутке. Такое изменение приводит к быстрому



**Рис. 2.** Расчетная конфигурация релятивистской ЛОВ: 1 — катод, 2 — резонансный отражатель, 3 — электронный пучок, 4 — замедляющая система, 5 — СВЧ-поглотитель.



**Рис. 3.** Геометрия магнитоизолированного диода ЛОВ: 1 — катод, 2 — анод, 3 — подвижный диэлектрический цилиндр (размеры указаны в миллиметрах).

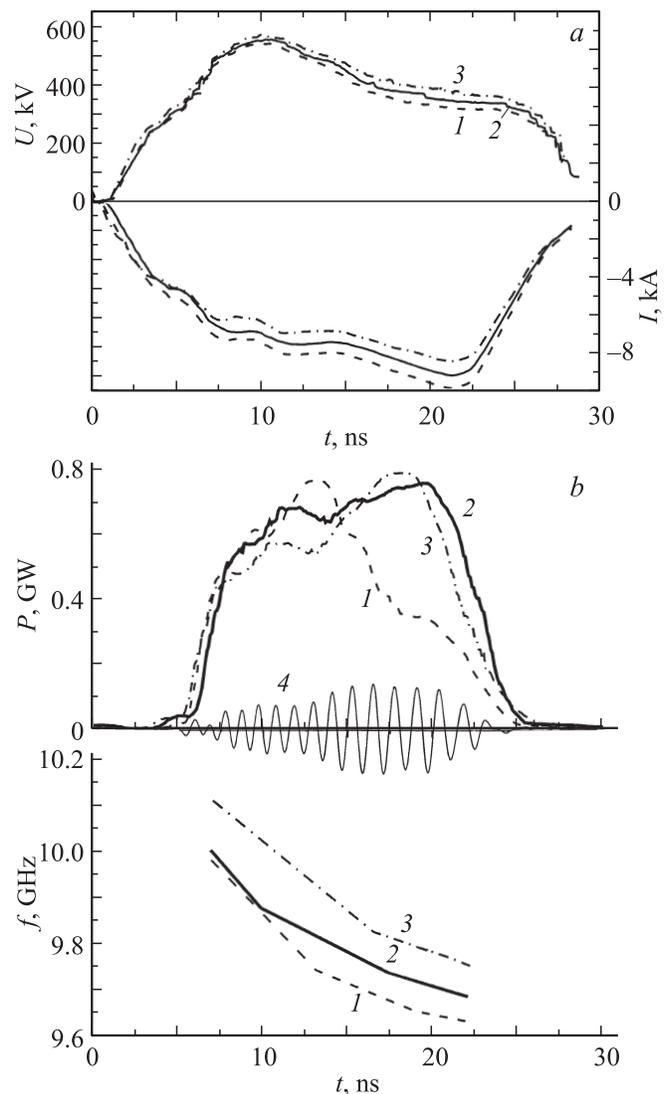
изменению продольной скорости частиц и обеспечивает модуляцию частоты генерации в течение импульса. Диапазон возможной частотной перестройки сужается при переходе от слабoreлятивистских к релятивистским энергиям частиц, но при умеренно релятивистских энергиях частиц он остается достаточно большим для компрессии импульсов. В соответствии с целью данных исследований для получения генерации мощностью в несколько сотен мегаватт при напряжении до 600 кВ и электронном токе менее 10 кА была выбрана довольно типичная конфигурация ЛОВ с рабочей волной  $TM_{0,1}$  (рис. 2) [10].

Следует отметить, что в ЛОВ частота генерации существенно зависит не только от геометрии системы, напряжения и тока электронного пучка, но и от таких, на первый взгляд, второстепенных факторов, как поля статического и высокочастотного пространственного заряда, влияние несинхронных частиц СВЧ-полей, в том числе волны, отраженной от катодного конца электродинамической системы, а также от величины ведущего магнитного поля и др. Адекватный учет всех этих факторов оказывается возможным лишь при использовании достаточно развитых численных моделей.

В результате численных расчетов, проведенных, в частности, на основе универсального PIC-кода KARAT [14], была найдена конфигурация ЛОВ (рис. 2), обеспечивающая одновременно высокую выходную мощность, высокий КПД и достаточно широкую полосу перестройки частоты излучения [7]. Для вывода излучения в сторону коллектора в исследуемой ЛОВ используется резонансный рефлектор [15], обеспечивающий транс-

портировку электронного пучка, идущего на небольшом расстоянии от стенки периодической электродинамической структуры, а также способствующий [12] существенному повышению КПД генератора. Согласно расчетам, при значениях тока пучка 4–7 кА практически во всем рабочем интервале спада напряжения обеспечивается КПД 25–30%, а частота генерации плавно изменяется от 10 до 9.5 GHz при изменении во времени ускоряющего напряжения от 600 до 300 кВ.

Разработанная ЛОВ была исследована в экспериментах на ускорителе „СИНУС-6“, в котором импульс ускоряющего напряжения формируется с помощью трансформатора Тесла и длинной коаксиальной линии. В типичных режимах ускоритель обеспечивает импульсы напряжения до 600 кВ с током 6–7 кА, плоской вершиной



**Рис. 4.** Временные зависимости параметров ЛОВ для нескольких расстояний  $L_{AC}$  между катодом и диэлектрической вставкой (4 мм — 1, 6 — 2, 8 — 3): а — ускоряющее напряжение и ток; б — выходная мощность и мгновенная частота генерации, найденная в результате обработки гетеродинированного сигнала, 4 — гетеродинированный сигнал для  $L_{AC} = 6$  мм.

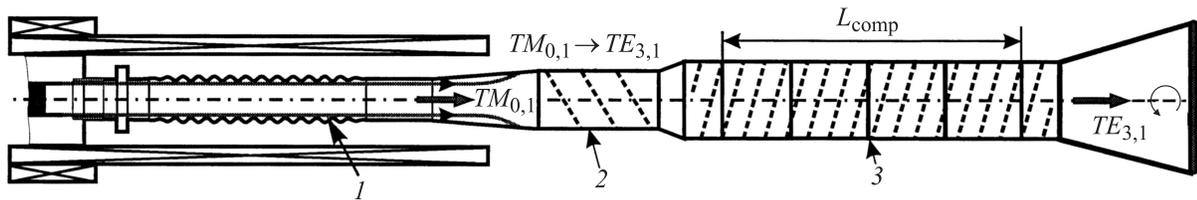


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 — релятивистская ЛОВ, 2 — волноводный преобразователь, 3 — компрессор.

длительностью 15 ns и участками спадания/нарастания на фронтах длительностями 5–10 ns. Эксперименты проводились в режиме разовых импульсов, повторяющихся через 1–2 min. Из-за особенностей конструкции ускорителя получение необходимого для частотной модуляции спада напряжения в течение импульса с помощью модификации внешних цепей практически исключено. Необходимый спад получен путем внутренней модификации, заключающейся во внесении в область магнитоизолированного коаксиального диода тонкого диэлектрического цилиндра (рис. 3) [16].

Во время взрывной эмиссии диэлектрический цилиндр приводит к четкому регистрируемому значительному спаду импеданса диода с характерным временным масштабом 10–20 ns. Это происходит, по-видимому, в результате быстрого пробоя по поверхности диэлектрика и ведет к необходимому спаду ускоряющего напряжения и росту тока в течение импульса.

В экспериментах с ЛОВ исследовалась возможность генерации мощных частотно-модулированных импульсов. Мощность выходного СВЧ-излучения измерялась на основе калориметрических измерений полной энергии и обработки сигналов с калиброванных детекторов на горячих носителях. Мгновенная частота генерации ЛОВ находилась в результате компьютерной обработки гетеродинированного сигнала на промежуточной частоте, который получался смещением части выходного излучения ЛОВ и опорного сигнала на фиксированной частоте, излучаемого импульсным магнетроном с мощностью около 80 kW, на детекторе на горячих носителях.

Как показали исследования, изменение расстояния  $L_{AC}$  от кромки катода до диэлектрической вставки (рис. 3) оказывает существенное влияние на величину и темп изменения ускоряющего напряжения и, как следствие, на ход частоты в импульсе на выходе ЛОВ (рис. 4). Поскольку компрессия в диспергирующей среде достигает высоких значений только при вполне определенном согласовании закона частотной модуляции входного сигнала и закона частотной дисперсии, значение  $L_{AC}$  было одним из основных параметров, по которым проводилась оптимизация комбинации ЛОВ с компрессором.

### 3. Комбинация релятивистской ЛОВ и компрессора

Для экспериментального исследования компрессии релятивистская ЛОВ и винтовой волновод-компрессор

были соединены в общую вакуумную систему (рис. 5). Винтовой компрессор собран из четырех секций с регулярной гофрировкой (три секции по восемь периодов и одна секция, содержащая шесть периодов) и двух секций сходов с линейно нарастающей и спадающей гофрировкой для ввода и вывода излучения. Для передачи мощности от ЛОВ с рабочей модой  $TM_{0,1}$  в компрессор, рабочей волной на входе которого является вращающаяся волна  $TE_{3,1}$ , был изготовлен преобразователь, который, согласно расчетам и „холодным“ измерениям, обеспечивал коэффициент трансформации по мощности более 95% в полосе частот 9.5–10 GHz и обладал достаточно высокой электропрочностью [17].

Выходная мощность из системы ЛОВ–компрессор, излучаемая через рупор, закрытый лавсановым окном диаметром 300 mm и толщиной 0.3 mm, поглощалась затем в калориметре диаметром 600 mm.

Оптимизация компрессии проводилась подбором параметров, влияющих на ход частотной модуляции и выходную мощность ЛОВ, — расстояния  $L_{AC}$  между краями катода и диэлектрической вставки и диаметра электронного пучка, а также общей длины  $L_{comp}$  регулярной части компрессора, варьируемой с помощью секции длиной в 6 периодов. В результате для величины  $L_{AC} = 6$  mm и длины компрессора  $L_{comp} = 972$  mm в скомпрессированном импульсе была получена пиковая мощность 3.2 GW (рис. 6, кривая 2). Длительность импульса по полувысоте составляла примерно 2.2 ns.

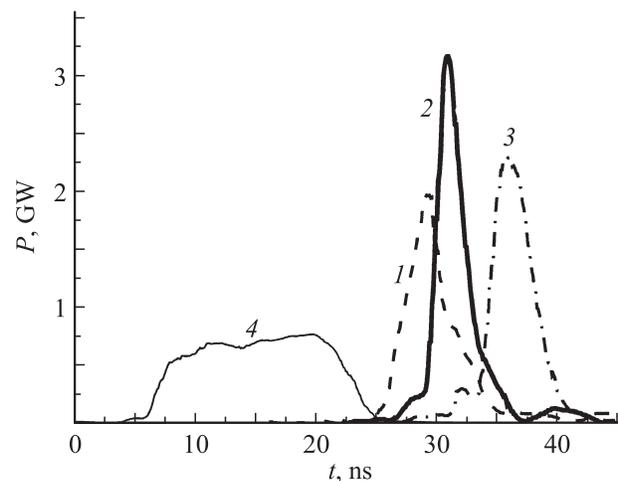


Рис. 6. Импульсы на выходе комбинации ЛОВ и компрессора при различных расстояниях  $L_{AC}$ ; 4 mm — 1, 6 — 2, 8 — 3 (для сравнения показан импульс 4 на выходе ЛОВ при  $L_{AC} = 6$  mm).

По отношению к импульсу с выхода ЛОВ, имевшему мощность 0.7 GW, достигнута 4–5-кратная компрессия.

Считая, что „полезная“ часть импульса содержит энергию, равную произведению его полуширины на пиковую мощность, получаем, что эффективность компрессии составляет 70% (остальная энергия уходит в боковые лепестки импульса). Отметим достаточно высокую стабильность и повторяемость скомпрессированных импульсов: вариации пиковой мощности не превышали 12% от „выстрела“, к “выстрелу“. Важно также подчеркнуть, что небольшой подстройкой длины  $L_{AC}$ , осуществляемой оперативно и без развакуумирования системы, достигалось существенное (от 2.2 до 15 ns) изменение длительности выходного импульса с сохранением его энергии в пределах 8–11 J, что представляется удобным для ряда приложений мощного СВЧ-излучения.

## Заключение

Продемонстрирована возможность генерации коротких микроволновых импульсов мультигигаваттного уровня мощности путем пассивной компрессии частотно-модулированного излучения релятивистской ЛОВ. В эксперименте импульс излучения с выхода ЛОВ диапазона 3 см длин волн длительностью 15 ns и мощностью 0.7 GW был сжат до длительности 2.2 ns при увеличении пиковой мощности до 3.2 GW. Согласно расчетам, увеличение длительности импульса ЛОВ до 40–50 ns позволит дополнительно увеличить мощность излучения в 2–3 раза.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 10-02-00975).

## Список литературы

- [1] Applications of High-Power Microwaves / Ed. by A.V. Gaponov-Grekhov and V.L. Granatstein. Norwood, MA—Artech House, Boston, 1994. 364 p.
- [2] Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И. и др. // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 7. С. 1488.
- [3] Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В., Ульмаскулов М.Р., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 2. С. 81.
- [4] Eltchaninov A.A., Korovin S.D., Mesyats G.A., Pegel I.V., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2004. Vol. 32. N 3. P. 1093.
- [5] Samsonov S.V., Phelps A.D.R., Bratman V.L., Burt G., Denisov G.G., Cross A.W., Ronald K., He W., Yin H. // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 92. P. 18 301.
- [6] Burt G., Samsonov S.V., Phelps A.D.R., Bratman V.L., Ronald K., Denisov G.G., He W., Young A.R., Cross A.W., Konoplev I.V., Yin H., Whyte C.G. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2005. Vol. 33. N 2. P. 661.
- [7] Братман В.Л., Денисов Г.Г., Самсонов С.В., Кросс А.У., Рональд К., Фелпс А.Д.Р. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 1. С. 40.
- [8] Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов. М.: Сов. радио, 1974. 360 с.

- [9] Ахманов С.А., Вислоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемто-секундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988. 310 с.
- [10] Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. № 4. С. 232.
- [11] Carmel Y., Ivers J., Kribel R.E., Nation J // Phys. Rev. Lett. 1974. Vol. 33. P. 21.
- [12] Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьмичников Е.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. XLII. № 12. С. 1189.
- [13] Burt G., Samsonov S.V., Ronald K., Denisov G.G., Young A.R., Bratman V.L., Phelps A.D.R., Cross A.W., Konoplev I.V., He W., Thomson J., Whyte C.G. // Phys. Rev. E. 2004. Vol. 70. N 4. P. 046 402.
- [14] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA: BRA, 1992.
- [15] Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Samsonov S.V. // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1995. Vol. 16. N 4. P. 745–752.
- [16] Бесчаснов А.М., Братман В.Л., Колганов Н.Г., Мишакин С.В., Самсонов С.В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 3. С. 96.
- [17] Денисов Г.Г., Самсонов С.В., Соболев Д.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 12. С. 1056.