

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМ ВВОДА ВНЕШНЕГО СИГНАЛА В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛАМПЕ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ С РЕЗОНАНСНЫМ РЕФЛЕКТОРОМ

© 2019 г. Э. Б. Абубакиров^{1, *}, Р. М. Розенталь¹, В. П. Тараканов^{2, 3}

¹Институт прикладной физики РАН,
Российская Федерация, 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

²Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,
Российская Федерация, 115409 Москва, Каширское шос., 31

³Объединенный институт высоких температур РАН,
Российская Федерация, 125412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

*E-mail: edward@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 12.07.2017 г.

После доработки 26.09.2017 г.

Принята к публикации 05.10.2017 г.

Для лампы обратной волны (ЛОВ) с резонансным рефлектором проведено сравнение схем подключения входного сигнала. Показано, что ввод излучения от внешнего источника через входной резонатор более эффективен по сравнению с подключением сигнала с коллекторной стороны прибора. Такое преимущество проявляется и в большем коэффициенте линейного усиления входного сигнала, и в меньшей мощности, требуемой для синхронизации ЛОВ-автогенератора внешним источником.

DOI: 10.1134/S0033849419010017

ВВЕДЕНИЕ

Предложенная в [1] релятивистская лампа обратной волны (ЛОВ) с резонансным рефлектором-модулятором по сравнению с исходными вариантами генераторов, в которых для отражения рабочей волны используется закритическое сужение на катодном конце системы [2, 3], обладает рядом преимуществ. В частности, такие генераторы характеризуются значительно большим КПД, достигающим значения около 40% (при использовании сильного магнитного поля, транспортирующего сильнооточный электронный пучок), возможностью освоения больших электронных токов и увеличения мощности микроволновых импульсов за счет повышения поперечных размеров замедляющей системы [4], а также возможностью механической перестройки частоты, диапазон которой может достигать 14% [5]. В этой связи представляет интерес исследование неавтономных режимов работы таких генераторов. В частности, СВЧ-усилители и генераторы с навязываемой внешним сигналом фазой излучения субгигаваттного уровня мощности могут быть использованы в качестве системы питания ускорителей заряженных частиц со сверхвысоким (1 ГэВ/м и более) темпом ускорения [6].

Традиционная схема ввода внешнего сигнала в релятивистской ЛОВ, исследованная в ряде теоретических и экспериментальных работ [7–11], предполагает подачу внешнего сигнала с коллекторной стороны пространства взаимодействия,

т.е. по основному ходу рабочей волны в приборе, распространяющейся навстречу электронному потоку. В свою очередь, ЛОВ с резонансным рефлектором-модулятором позволяет реализовать и другой способ включения управляющего сигнала, а именно его ввод непосредственно в резонатор. Причем в последнем случае привлекательным представляется вариант, в котором волна, возбуждаемая внешним источником, и излучение самой ЛОВ подводятся к резонатору с разных сторон. Очевидное достоинство такого включения по сравнению со способом возбуждения через отверстия связи в стенках резонатора [12, 13] состоит в электродинамической развязке между входным и выходным излучением, которую осуществляет отражающий резонатор. Кроме того, подобный способ ввода позволяет, в частности в гиротронах [14], снизить мощность внешнего сигнала, необходимую для синхронизации генератора.

Цель данной работы – определить, насколько эффективным может быть такой способ возбуждения ЛОВ с точки зрения достижения больших коэффициентов усиления или обеспечения большей частотной полосы синхронизации генератора.

1. ЛИНЕЙНОЕ УСИЛЕНИЕ В ЛОВ В РАЗНЫХ СХЕМАХ ВКЛЮЧЕНИЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Рассмотрим модель ЛОВ с электродинамической системой в виде отрезка гофрированного

волновода круглого сечения длиной L , пронизываемой трубчатым электронным пучком (рис. 1). Предположим, что синхронной электронному пучку является замедленная гармоника одной из мод, для которой выполнено условие синхронизма $\omega = hV_0$, где ω , h – частота и волновое число замедленной гармоника, V_0 – начальная скорость электронов. В сильном ведущем магнитном поле электроны взаимодействуют преимущественно с продольным электрическим полем, которое в области пучка может быть представлено в виде

$$E(z, t) = \text{Re}(E_z \exp(i(\omega t - hz))).$$

Будем полагать, что резонансный рефлектор длиной L_m располагается на расстоянии L_d от начала гофрированного участка.

Режим усиления в релятивистской ЛОВ из-за сложности одновременного обеспечения высоких значений коэффициента усиления и КПД используется преимущественно в предварительных каскадах в составе секционированных устройств [15, 16]. Поэтому анализ работы ЛОВ в таком режиме выполним в линейном приближении, считая мощность входного (и выходного) сигнала в ЛОВ малой по сравнению с мощностью электронного потока. В этом приближении самосогласованная система уравнений ЛОВ в одномерной модели взаимодействия частиц и поля [17] может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} d^2 J / dx^2 &= ia, \\ da / dx + iba &= CJ. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $a = \pi e E_z \omega L^2 / mc^3 \gamma_0^3$ – безразмерная амплитуда электрического поля синхронной волны, $b = (h - \omega / V_0)L$ – начальная расстройка синхронизма, $C = \frac{kL}{\gamma_0} \left(\frac{eI_0 Z}{2mc^2} \right)$ – параметр связи, I_0 – конвекционный ток пучка, Z – сопротивление связи электронов с волной, γ_0 – начальный релятивистский фактор частиц, $J = \int_0^{2\pi} \exp(-ibx - i(\omega t - hz)) d(\omega t_0)$ – величина, пропорциональная амплитуде высокочастотного тока пучка, $x = z/L$ – нормированная продольная координата. Для упрощения в уравнениях (1) предположено, что влияние пространственного заряда на работу ЛОВ пренебрежимо мало. Представляя область рефлектора как модулирующий зазор малой длины, его влияние учтем, как и в [18], через граничные условия к системе (1):

$$\begin{aligned} J(0) &= i\alpha x_m x_d (a(0) \exp(i\varphi) + a_l), \\ J'(0) &= i\alpha x_m (a(0) \exp(i\varphi) + a_l). \end{aligned} \quad (2)$$

Эти условия описывают поступление на вход ЛОВ электронного пучка, модуляция которого обусловлена совместным действием внешнего

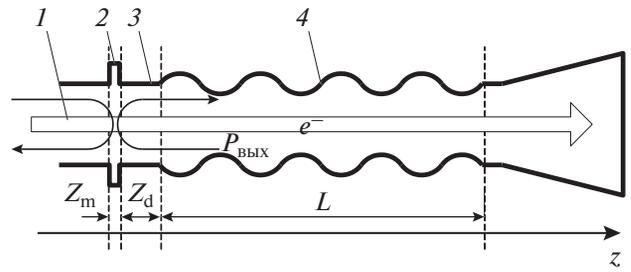


Рис. 1. Схема ввода внешнего сигнала в ЛОВ с резонансным рефлектором: 1 – электронный пучок, 2 – резонансный рефлектор, 3 – дрейфовое пространство, 4 – секция ЛОВ.

сигнала a_l и выходного излучения ЛОВ $a(0)\exp(i\varphi)$, фактор α описывает эффективность возбуждения резонатора. Величина φ соответствует фазовому набегу волны ЛОВ при ее распространении через дрейфовое пространство, $x_m = Z_m/L$ и $x_d = Z_d/L$ – нормированные длины участков модулятора и дрейфа соответственно. Непосредственная подача сигнала в ЛОВ описывается граничным условием, задаваемым на коллекторном конце рабочего пространства

$$a(1) = a_r, \quad (3)$$

где a_r – амплитуда внешнего сигнала, подаваемого в ЛОВ-секцию.

Для нахождения решения задачи (1) с граничными условиями (2) и (3) вблизи порога самовозбуждения воспользуемся подходом, развитым в [19]. Введем в рассмотрение сопряженную к (1)–(3) задачу, в которой амплитуды входных сигналов примем равными нулю:

$$\frac{d^2 J^c}{dx^2} = ia^c, \quad \frac{da^c}{dx} - ib_0 a^c = -C_0 J^c, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} J^c(1) &= -i\alpha x_m (a^c(1) \exp(i\varphi)), \\ J^c(1) &= i\alpha x_m x_d (a^c(1) \exp(i\varphi)), \\ a^c(0) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $a^c(x) = a_0(1 - x)$, $J^c(x) = J_0(1 - x)$, где продольное распределение поля $a_0(x)$, высокочастотного тока $J_0(x)$, а также стартовый параметр связи C_0 и отстройка b_0 определяются из решения системы (1) с граничными условиями (2) и (3), в которых амплитуды внешних сигналов равны нулю $a_l = 0$ и $a_r = 0$.

Умножим уравнения (1) в порядке их расположения на $-iC_0 J^c(x)$ и $a^c(x)$, уравнения (4) на $a(x)$ и $iCJ(x)$, а затем просуммируем полученные вы-

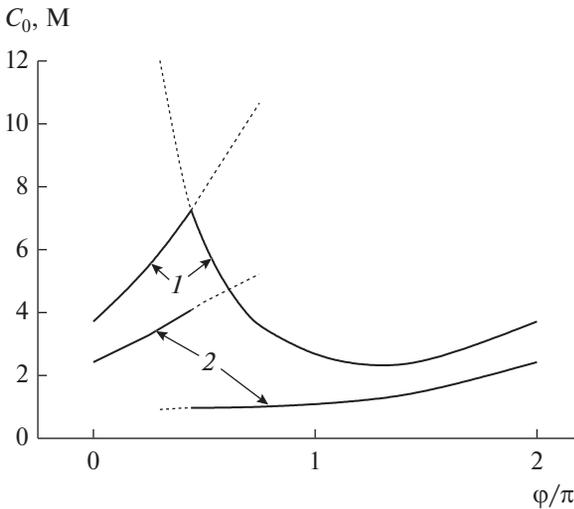


Рис. 2. Зависимости стартового параметра связи C_0 (кривая 1) и отношения эффективностей возбуждения M (кривая 2) от величины фазового набег в дрейфовом пространстве. Сплошные участки кривых относятся к моде, имеющей наименьший стартовый ток, штриховые — к более высоким продольным модам генератора.

ражения. После несложных преобразований получаем

$$i(b - b_0)aa^c - (C - C_0)Ja^c + iC_0 \frac{d}{dx} \left[J \frac{dJ^c}{dx} - J^c \frac{dJ}{dx} \right] + \frac{d}{dx} (aa^c) = 0. \quad (6)$$

Проинтегрировав (6) вдоль отрезка $[0; 1]$ с учетом граничных условий, нетрудно получить соотношение, удобное для приближенных расчетов в случае небольшой отстройки рабочего тока от стартового значения:

$$i(b - b_0) \int_0^1 a_0(x) a_0(1 - x) dx - (C - C_0) \times \int_0^1 J_0(x) a_0(1 - x) dx = -a_{00} - i\alpha C_0 a_0 x_m \left(J_0(1) + x_d \frac{dJ_0(1)}{dx} \right). \quad (7)$$

Откуда для коэффициентов усиления $K_l = a(0)/a_i$ и $K_r = a(0)/a_r$ получаем

$$K_r = \left((C - C_0) \int_0^1 J_0(x) a_0(1 - x) dx - i(b - b_0) \int_0^1 a_0(x) a_0(1 - x) dx \right)^{-1}, \quad (8)$$

$$K_l = i\alpha C_0 x_m \left(J_0(1) + x_d \frac{dJ_0(1)}{dx} \right) K_{00}.$$

Таким образом, при равных амплитудах входных сигналов, подаваемых в модулятор (a_i) и в секцию

ЛОВ (a_r), отношение выходных амплитуд в этих ситуациях составляет величину

$$M = \alpha C_0 x_m \left| J_0(1) + x_d \frac{dJ_0(1)}{dx} \right|.$$

Оценим это значение. Величина $a(0)\alpha x_m$ представляет собой безразмерную работу ВЧ-поля над электронами в зазоре модулятора. Режимы работы ЛОВ с сосредоточенным рефлектором обычно таковы [1, 18], что это значение равно по порядку величины работе поля в ЛОВ-секции, т.е. вследствие нормировки продольной координаты близко к $a(0)$, тогда, соответственно, $\alpha x_m \sim 1$. Амплитуды ВЧ-тока и его производной на выходе из пространства взаимодействия единичной длины с входной амплитудой $a(0) = 1$, как и их линейная комбинация $\left| J_0(1) + x_d \frac{dJ_0(1)}{dx} \right|$, имеют тот же порядок. В результате определяющим для величины M оказывается стартовое значение параметра связи C_0 .

Для количественного сравнения различных схем подключения входного сигнала рассмотрим в качестве примера работу усилителя на базе ЛОВ с рефлектором с параметрами, характерными для практических конструкций: глубина модуляции $\alpha x_m = 0.5$, отношение длины пространства дрейфа к длине замедляющей системы $x_d = 0.25$. Величина стартового параметра связи C_0 в зависимости от фазового набег φ рабочей волны при ее распространении через дрейфовое пространство меняется в довольно широких пределах (рис. 2, см. также [18]), а в целом кривая имеет вид, характерный для нерегулярной ЛОВ, в частности, ЛОВ с концевыми отражениями [11]. Максимальный выигрыш по соотношению эффективностей усиления внешнего сигнала M (до 4 раз) при работе ЛОВ на нижней по величине стартового тока генерации моде достигается при фазовой задержке около $\pi/2$. Отметим, что при этом характерные значения C_0 близки к параметрам регулярной ЛОВ, в которой $C_0 \approx 8.7$. Согласно [18] такие условия наиболее благоприятны для эффективной работы ЛОВ с резонансным рефлектором. Таким образом, соответствующим подбором параметров можно при подаче входного сигнала в модулирующий зазор достичь существенного прироста коэффициента усиления (более чем на 10 дБ) по сравнению с ситуацией, которая реализуется при возбуждении внешним сигналом основной ЛОВ-секции.

2. PIS-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СИНХРОНИЗАЦИИ ЛОВ

В качестве тестовой конфигурации были выбраны параметры ЛОВ с рабочей частотой 32 ГГц, разработанной и экспериментально реализован-

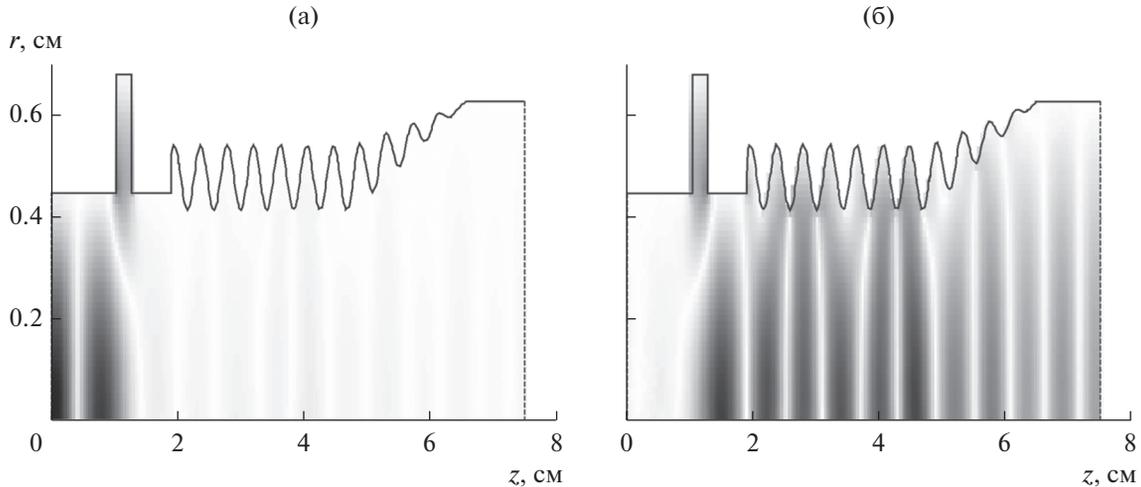


Рис. 3. PIC-моделирование: геометрия пространства взаимодействия и мгновенное распределение продольной компоненты высокочастотного электрического поля внешнего сигнала (без электронного потока) в случае синхронизации со стороны катода (а) и со стороны коллектора (б).

ной с целью возможности использования выходного сигнала с уровнем мощности в сотни мегаватт в качестве “микроволнового ондулятора” [20]. Моделирование было выполнено на основе 2.5-мерной аксиально-симметричной версии PIC-кода KARAT [21]. Электродинамическая система ЛОВ состояла из участка однородной аксиально-симметричной гофрировки длиной семь периодов и участка плавного схода гофрировки длиной четыре периода. Период гофрировки составлял 4.2 мм, амплитуда гофрировки – 0.65 мм. Резонансный рефлектор был расположен на расстоянии 6 мм от начала замедляющей системы. Рабочая мода E_{01} возбуждалась электронным пучком с энергией 0.55 МэВ, током 4 кА, общей длительностью 20 нс и длительностью переднего и заднего фронтов 5 нс. На рис. 3 показана геометрия системы и структура внешнего ВЧ-поля в PIC-моделировании. Согласно расчетам в автономном режиме работы выходная мощность ЛОВ составила $P_0 = 489$ МВт при частоте генерации $f_0 = 33.07$ ГГц.

Для сравнения исследуемых схем синхронизации ввод внешнего сигнала на моде E_{01} осуществлялся с левой и правой сторон системы. Отметим, что при подаче сигнала со стороны резонатора внешнее поле слабо проникает в основную систему ЛОВ (см. рис. 3), соответственно, генератор и источник внешнего сигнала оказываются электродинамически развязаны. Граница области синхронизации определялась путем перестройки частоты внешнего сигнала $f_{\text{внеш}}$ при фиксированной мощности $P_{\text{внеш}}$ и идентификации частот, при которых прекращался режим биений (рис. 4).

Результаты PIC-моделирования показывают, что и режим генерации оказывается более чув-

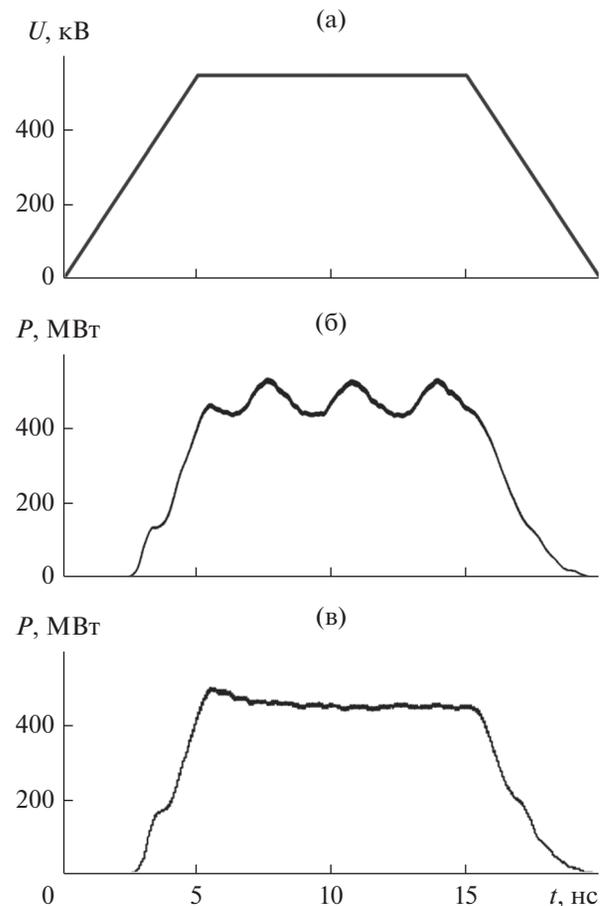


Рис. 4. Результаты PIC-моделирования: а – форма импульса ускоряющего напряжения, б – форма выходного сигнала в режиме биений ($f_{\text{внеш}} = 32.75$ ГГц), в – в режиме синхронизации ($f_{\text{внеш}} = 33.0$ ГГц) при $P_{\text{внеш}}/P_0 \approx 1.4\%$. Ввод внешнего сигнала осуществлялся с катодной стороны.

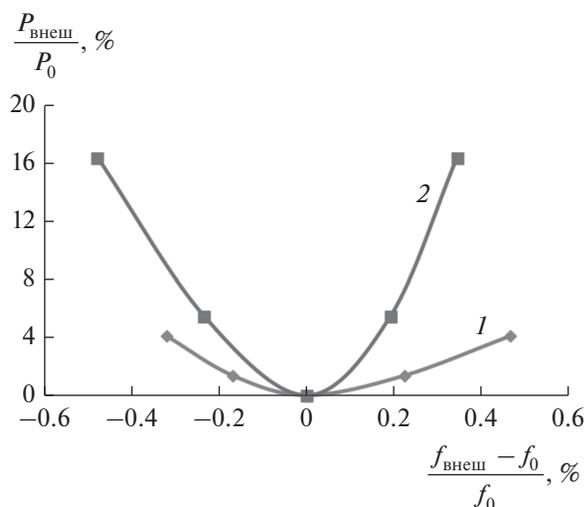


Рис. 5. Результаты PIC-моделирования: границы области синхронизации при вводе сигнала в ЛОВ с катодной стороны (кривая 1) и со стороны коллектора (кривая 2).

ствителен к входному сигналу в случае его подачи в рефлектор с катодной стороны системы. На рис. 5 показаны границы области захвата при различных уровнях мощности синхронизирующего сигнала. Хорошо видно, что в схеме с вводом внешнего сигнала со стороны коллектора ширина области синхронизации, при сопоставимом уровне мощности, примерно в три раза меньше, чем при вводе сигнала со стороны катода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты, выполненные как на основе линейной теории ЛОВ, так и на основе прямого численного PIC-моделирования, демонстрируют заметное преимущество схемы ввода внешнего сигнала с катодной стороны пространства взаимодействия в ЛОВ с резонансным рефлектором. Следует отметить еще одно преимущество подобной схемы: возможность сопряжения электронной пушки с системой дифракционного возбуждения рабочей волны во входном волноводе, что ранее было успешно реализовано в гироклистронах миллиметрового диапазона с уровнем выходной мощности в сотни киловатт [22, 23]. Это позволяет рассчитывать на увеличение электропрочности входного узла и, соответственно, на расширение диапазона допустимой мощности входного сигнала.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной в рамках государственного задания

на проведение научных исследований по теме 0035-2014-012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 10. С. 43.
2. Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. Вып. 4. С. 232.
3. Carmel Y., Ivers J., Kribel R.E., Nation J. // Phys. Rev. Lett. 1974. V. 33. № 21. P. 1278.
4. Ростов В.В., Тотьменинов Е.М., Яландин М.И. // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 11. С. 85.
5. Тотьменинов Е.М., Выходцев П.В., Кицанов С.А. и др. // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 7. С. 111.
6. Tantawi S.G. // IEEE Intern. Vacuum Electronics Conf. Monterey, CA, 22–24 April 2014. P. 1.
7. Abubakirov E.B., Konyushkov A.P. // IEEE Trans. 2010. V. PS-38. № 6. P. 1285.
8. Song W., Teng Y., Zhang Z.Q. et al. // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. P. 083105.
9. Teng Y., Song W., Sun J. et al. // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. P. 043303.
10. Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Конюшков А.П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 5. С. 413.
11. Ryskin N.M., Titov V.N., Umantsiva O.V. // IEEE Trans. 2016. V. PS-44. № 8. P. 1270.
12. Xiao R., Song Z., Deng Y., Chen C. // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. № 9. P. 093108.
13. Wu Y., Li Z.H., Xu Z. et al. // Phys. Plasmas. 2014. V. 22. № 8. P. 083103.
14. Ергаков В.С., Моисеев М.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. № 1. С. 120.
15. Волков А.Б., Зайцев Н.И., Иляков Е.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. № 12. С. 6.
16. Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Fuchs M.I. et al. // IEEE Trans. 2002. V. PS-30. № 3. P. 1041.
17. Ковалев Н.Ф., Петрухина В.И., Сморгонский А.В. // РЭ. 1975. Т. 20. № 7. С. 1547.
18. Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189.
19. Ковалев Н.Ф. // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. 1982. № 1. С. 16.
20. Абубакиров Э.Б., Бандуркин И.В., Вихарев А.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58. № 10. С. 841.
21. Тараканов В.П. // Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003. С. 456.
22. Антаков И.И., Гачев И.Г., Засыпкин Е.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 3. С. 185.
23. Засыпкин Е.В., Гачев И.Г., Антаков И.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 5. С. 341.