УДК 621.385.6

ИССЛЕДОВАНИЕ МИНИАТЮРНОГО НИЗКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ПЛАНАРНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ

Р. А. Торгашов[1,2], *А. И. Бенедик*[1], *Н. М. Рыскин*[1,2]

[1]Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
[2]Саратовский филиал Института радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 410019 Саратов, Зелёная, 38
E-mail: torgashovra@gmail.com; andrej-benedik@yandex.ru; RyskinNM@info.sgu.ru
Поступила в редакцию 14.07.2017

Освоение терагерцевого диапазона частот является одной из приоритетных проблем современной вакуумной СВЧ-электроники. При создании подобных СВЧ-устройств для повышения мощности и КПД целесообразно использовать пространственно-развитые замедляющие системы (ЗС) и электронные пучки с большим поперечным сечением. Также при миниатюризации приборов принципиальным становится вопрос снижения ускоряющего напряжения. Перспективными в этом случае являются планарные ЗС на диэлектрических подложках.

В данной работе проведены исследования низковольтного генератора миллиметрового диапазона на основе лампы обратной волны (ЛОВ) с ленточным электронным пучком и планарной встречно-штыревой ЗС на подложке из кварца.

Расчеты электродинамических характеристик ЗС показали, что она обладает большим замедлением и достаточной широкой полосой частот: при относительно небольших значениях напряжения 1.0–3.5 kV обеспечивается перестройка частоты в диапазоне 60–75 GHz. Сопротивление связи, усредненное по сечению пучка 500×50 μm^2, который располагается на расстоянии 50 μm от металлизированной поверхности ЗС, увеличивается с ростом частоты от 2 Ω до 40 Ω в рабочем диапазоне частот.

Исходя из этих результатов, были получены необходимые для компьютерного моделирования параметры ЛОВ–генератора. Для компьютерного моделирования использовались известные уравнения одномерной нестационарной теории ЛОВ с учетом сил пространственного заряда и потерь в замедляющей системе. Были проведены расчеты самовозбуждения генератора, ЗС которого состояла из 50 периодов. Для данной ЗС стартовый ток составляет 10–30 mA, что соответствует плотности 50–100 A/cm^2. При разумных значениях тока, не превышающих 50 mA, выходная мощность составляет 1–2 W.

© *Р.А. Торгашов, А.И. Бенедик, Н.М. Рыскин*

Исследованная в данной работе ЛОВ может быть использована в качестве генератора входного сигнала для усилителя на основе лампы бегущей волны с планарной ЗС.

Ключевые слова: Вакуумная микроэлектроника, миллиметровый диапазон, лампа обратной волны, встречно-штыревая замедляющая система, ленточный электронный пучок.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-35-46

Образец цитирования: Торгашов Р.А., Бенедик А.И., Рыскин Н.М. Исследование миниатюрного низковольтного генератора обратной волны миллиметрового диапазона с планарной замедляющей системой // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 5. С. 35-46. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-35-46

STUDY OF MINIATURIZED LOW-VOLTAGE BACKWARD-WAVE OSCILLATOR WITH A PLANAR SLOW-WAVE STRUCTURE

R. A. Torgashov[1,2], *A. I. Benedik*[1], *N. M. Ryskin*[1,2]

[1]Saratov State University
83 Astrakhanskaya Street, 410012 Saratov, Russia
[2]Saratov Branch, Institute of Radio Engineering and Electronics
38 Zelenaya Street, 410019 Saratov, Russia
E-mail: torgashovra@gmail.com; andrej-benedik@yandex.ru; RyskinNM@info.sgu.ru
Received 14.07.2017

The development of the terahertz frequency range is one of the priority problems of modern vacuum microwave electronics. For increasing power and efficiency of such devices, it is favorable to use spatially developed slow-wave structures (SWSs) and electron beams with a large cross section. For miniaturization of vacuum-tube devices, reducing of the accelerating voltage becomes a problem of principal importance. In this respect, planar SWSs on dielectric substrates are very promising. In this paper, the results of study of a miniaturized low-voltage millimeter-band backward-wave oscillator (BWO) with a sheet electron beam and planar interdigital SWS on silica substrate are presented. Calculations of the electromagnetic characteristics of the SWS showed that it has large slow-down factor and relatively wide passband. Frequency tuning in the 60–75 GHz range is provided at relatively low operation voltage 1.0–3.5 kV. The coupling impedance averaged over the 500×50 μm^2 beam cross section, increases with frequency from 2 to 40 Ω in the operating frequency range. The beam is placed at 50 μm distance from the metallized surface of the SWS. Based on these results, the parameters required for computer simulation were calculated. The well-known equations of the 1D nonstationary BWO theory considering the space charge forces and cold losses are used for the computer simulation. Self-excitation current for the BWO with SWS consisting of 50 periods was calculated. The starting current is about 10–30 mA, which corresponds to 50–100 A/cm^2 current density. The output power attains of 1–2 W for the current values not exceeding 50 mA. The BWO studied in this work can be used as a driver oscillator for a traveling-wave tube amplifier with planar SWS.

Keywords: Vacuum microelectronics, millimeter band, backward-wave oscillator, interdigital slow wave structure, sheet electron beam.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-35-46

References: Torgashov R.A., Benedik A.I., Ryskin N.M. Study of miniaturized low-voltage backward-wave oscillator with a planar slow-wave structure. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2017. Vol. 25. Issue 5. P. 35-46. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-35-46

© *Р.А. Торгашов, А.И. Бенедик, Н.М. Рыскин*

Введение

На данный момент освоение терагерцевого диапазона частот (0.1–3.0 THz) является одной из приоритетных проблем современной вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники. Исследованием миниатюрных аналогов классических генераторов и усилителей вакуумной электроники занимаются многие научные коллективы разных стран [1–4]. При создании электровакуумных СВЧ усилителей и генераторов О-типа в коротковолновых диапазонах для повышения мощности и КПД представляется целесообразным использование пространственно-развитых замедляющих систем (ЗС) и электронных пучков с большим поперечным сечением. Также при миниатюризации приборов принципиальным становится вопрос снижения ускоряющего напряжения. В этом отношении наиболее перспективными представляются планарные ЗС на диэлектрических подложках, предложенные в работе [5]. Предполагалось, что приборы с такими ЗС будут использованы для создания логических и запоминающих элементов СВЧ диапазона [6]. В работах [7, 8] представлены результаты разработки меандровой и встречно-штыревой ЗС на диэлектрических подложках из кварца и поликора для низковольтных приборов О-типа. ЗС были изготовлены с использованием технологии фотолитографии. В последние годы над созданием аналогичных ЗС работает ряд авторов [9–14].

В настоящей работе представлены результаты моделирования выходных характеристик низковольтного ЛОВ-генератора с ЗС типа «встречные штыри» средней части миллиметрового диапазона (60–75 GHz) на подложке из кварца.

1. Электродинамические характеристики ЗС типа «встречные штыри» на диэлектрической подложке

На рис. 1 представлено схематическое изображение и фотография ЗС типа «встречные штыри» на диэлектрической подложке из кварца. Геометрические размеры ЗС средней части миллиметрового диапазона представлены в Таблице.

Электродинамические характеристики данной ЗС исследовались в работах [7, 8]. При моделировании предполагалось, что ЗС помещена в прямоугольный волновод

Таблица. Геометрические размеры ЗС

Table. Dimensions of the Interdigital SWS

Период ЗС SWS period, d	100 μm
Высота штыря Pin length, l	825 μm
Ширина штыря Pin width, s	25 μm
Ширина вытравленного полоска Etched strip width, w	25 μm
Толщина металлического слоя Metallic strip thickness, t	1 μm
Толщина подложки Substrate thickness, h	500 μm
Количество периодов Number of periods	50

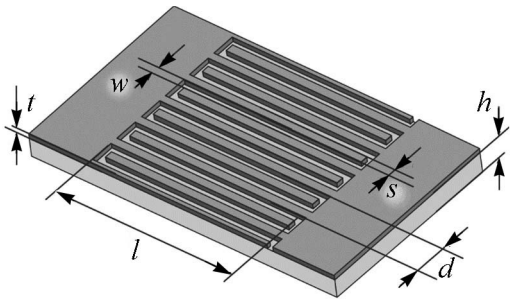

Рис. 1. Схематическое изображение планарной ЗС типа «встречные штыри» на диэлектрической подложке

Fig. 1. Schematic diagram of interdigital planar SWS on dielectric substrate

© Р.А. Торгашов, А.И. Бенедик, Н.М. Рыскин

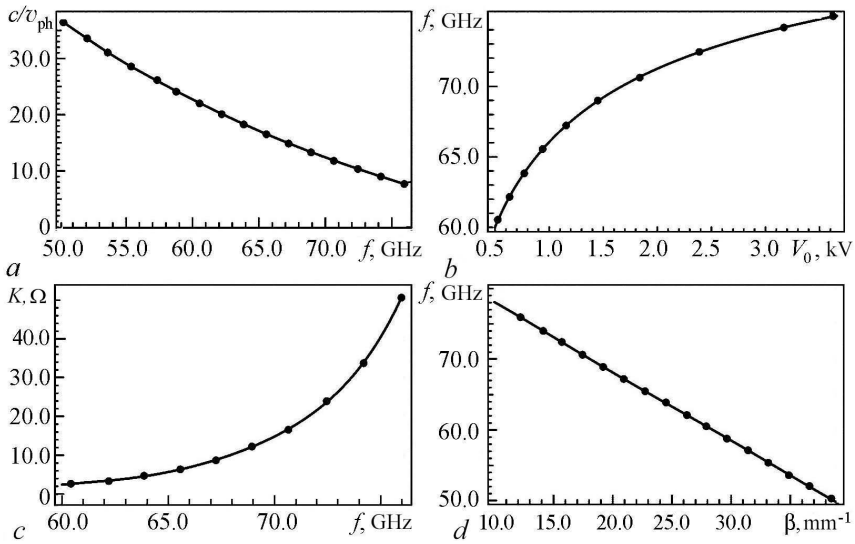

Рис. 2. Электродинамические характеристики ЗС типа «встречные штыри» на диэлектрической подложке: *a* – зависимость замедления от частоты; *b* – зависимость частоты синхронизма от напряжения пучка; *c* – зависимость сопротивления связи, усредненного по сечению пучка, от частоты; *d* – дисперсионная характеристика в рабочем диапазоне частот

Fig. 2. *a* – slow-wave factor vs frequency; *b* – the frequency of synchronism vs beam voltage; *c* – coupling impedance vs frequency; *d* – dispersion diagram in the operating frequency range

сечением 3.6×1.8 mm, при этом размеры волновода не оказывали существенного влияния на результаты расчетов. На рис. 2, *a* представлена зависимость замедления $c/v_{\rm ph}$ от частоты, а на рис. 2, *b* – зависимость частоты синхронизма от напряжения пучка V_0. Из этих рисунков видно, что ЗС обладает большим замедлением и достаточно широкой полосой частот. Соответственно, при относительно небольших рабочих значениях напряжения 1.0–3.5 kV обеспечивается перестройка частоты в пределах 60–75 GHz.

Рис. 2, *c* иллюстрирует зависимость сопротивления связи K от частоты. Сопротивление связи усреднено по сечению пучка 500×50 μm^2, который располагается на расстоянии 50 μm от металлизированной поверхности ЗС. Видно, что сопротивление связи растет с ростом частоты и составляет порядка 2–40 Ω в рабочем диапазоне частот. На рис. 2, *d* приведена дисперсионная характеристика ЗС. Из рисунка видно, что взаимодействие электромагнитной волны с пучком происходит на обратной пространственной гармонике.

2. Основные уравнения нестационарной теории ЛОВ и расчет параметров модели

Для компьютерного моделирования ЛОВ-генератора использовались известные уравнения одномерной нестационарной теории ЛОВ с учетом сил пространственного заряда (ПЗ) и потерь в ЗС (см., например, [15–17])

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} - \frac{\partial F}{\partial \xi} + dF = -LI_1, \tag{1}$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} = -L^2 \left(1 + \frac{1}{2\pi N}\frac{\partial \theta}{\partial \xi}\right)^3 \mathrm{Re}\left[Fe^{i\theta} + iq\sum_m \frac{I_m e^{im\theta}}{m}\right]. \tag{2}$$

© Р.А. Торгашов, А.И. Бенедик, Н.М. Рыскин

Уравнение (1) есть уравнение возбуждения волны током с медленно меняющейся амплитудой, а (2) представляет собой уравнение движения электронов в поле электромагнитной волны. Последний член в квадратных скобках в уравнении (2) отвечает за действие поля ПЗ, которое учитывается методом гармоник.

В уравнениях (1), (2) введены следующие обозначения: $\theta = (\omega_0 t - \beta_e z)$ – фаза электрона; ω_0 – частота синхронизма, на которой фазовая скорость $v_{\rm ph}(\omega_0)$ равна скорости электронов v_0; $\beta_e = \omega_0/v_0$ – электронная постоянная распространения; $I_m = 1/\pi \int_0^{2\pi} e^{-im\theta} d\theta_0$ – m-я гармоника сгруппированного тока; $F(\xi, \tau) = E_z/(2\beta_e V_0 C^2)$ – безразмерная амплитуда синхронной гармоники поля E_z. Безразмерные координата ξ и время τ введены следующим образом:

$$\xi = z/l, \quad \tau = \frac{t - z/v_0}{l/v_0 + l/v_g},$$

где v_g – групповая скорость, l – длина пространства взаимодействия. Как видно из рис. 2, *d*, групповую скорость в рабочем диапазоне частот можно считать постоянной, $v_g \approx 6.175 \times 10^6$ m/s.

Система (1), (2) содержит четыре безразмерных параметра: L, N, q и d. Здесь $L = 2\pi CN$ – безразмерный параметр, имеющий смысл нормированной длины пространства взаимодействия; $N = \beta_e l/2\pi$ – электрическая длина; $C = (I_0 K/4V_0)^{1/3}$ – параметр усиления Пирса; I_0 и V_0 постоянный ток пучка и напряжение пучка, соответственно; K – сопротивление связи; $q = (\omega_p R/\omega_0 C)^2$ – параметр ПЗ (ω_p – плазменная частота, R – коэффициент редукции, который в расчетах принят равным 0.5); d – параметр холодного затухания.

Уравнения (1), (2) следует дополнить граничными условиями для электронного пучка

$$\theta|_{\xi=0} = \theta_0, \quad \left.\frac{\partial\theta}{\partial\xi}\right|_{\xi=0} = 0, \tag{3}$$

которые отражают отсутствие модуляции пучка на входе в ЗС, а также граничным условием для ВЧ-поля, которое в случае ЛОВ-генератора имеет вид

$$F(\xi = 1) = 0. \tag{4}$$

Если рассматривать установившийся режим колебаний с постоянной амплитудой и частотой, из уравнений (1), (2) следует закон сохранения (интеграл энергии), который с учетом омических потерь имеет вид

$$\eta = \frac{C\,|F(\xi = 0)|^2}{2} + dC \int\limits_0^1 |F(\xi)|^2\, d\xi, \tag{5}$$

где η – электронный КПД

$$\eta = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{(1 + \theta_\xi/2\pi N)} d\theta_0. \tag{6}$$

Очевидно, что мощность, отдаваемая в нагрузку, есть

$$P_{\rm out} = I_0 V_0 \frac{C\,|F(\xi = 0)|^2}{2}. \tag{7}$$

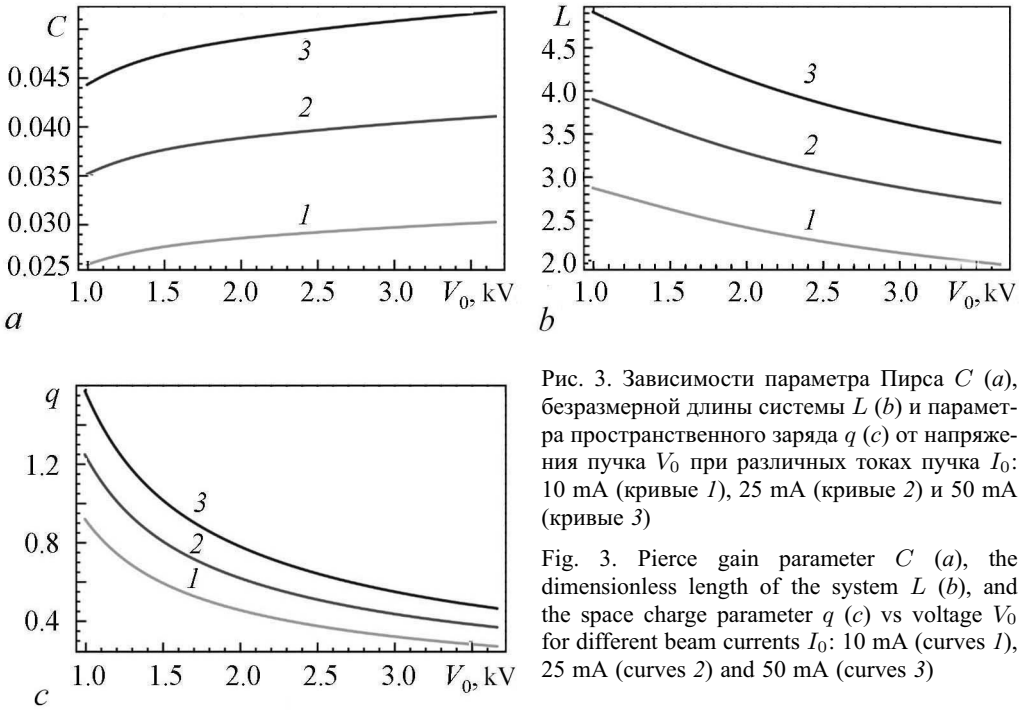

Рис. 3. Зависимости параметра Пирса C (*a*), безразмерной длины системы L (*b*) и параметра пространственного заряда q (*c*) от напряжения пучка V_0 при различных токах пучка I_0: 10 mA (кривые *1*), 25 mA (кривые *2*) и 50 mA (кривые *3*)

Fig. 3. Pierce gain parameter C (*a*), the dimensionless length of the system L (*b*), and the space charge parameter q (*c*) vs voltage V_0 for different beam currents I_0: 10 mA (curves *1*), 25 mA (curves *2*) and 50 mA (curves *3*)

Корректность проводимых расчетов контролировалась выполнением закона сохранения (5).

На основании результатов, полученных при электродинамическом моделировании планарной ЗС (см. раздел 1), были рассчитаны необходимые для компьютерного моделирования параметры: параметр Пирса C, нормированная длина пространства взаимодействия L и параметр пространственного заряда q при различных токах пучка. Результаты расчётов представлены на рис. 3.

Параметр холодного затухания был выбран равным $d = 1.75$, что соответствует затуханию порядка -15 dB/cm. Такое значение согласуется с данными холодных измерений [8].

3. Результаты компьютерного моделирования ЛОВ-генератора

Перейдем к результатам компьютерного моделирования режимов колебаний ЛОВ. Прежде всего, были проведены расчеты самовозбуждения генератора. Изготовленные ранее образцы ЗС имели длину 2 mm, то есть 20 периодов [7, 8]. Однако, как показывает моделирование, в этом случае требуется ленточный пучок с ультравысокой плотностью, превышающей 500 A/cm^2. Хотя такой пучок в принципе может быть реализован [18], его формирование и транспортировка представляет чрезвычайно сложную задачу. Поэтому в данной работе рассматривается удлиненная ЗС, состоящая из 50 периодов. Для такой ЗС стартовый ток составляет 10–30 mA. Соответствующая зависимость стартового тока от напряжения показана на рис. 4. С учетом поперечных размеров пучка 500×50 μm^2 можно найти, что плотность тока в данном случае должна быть равна 50–100 A/cm^2. Ленточные пучки с аналогичными характеристиками были недавно реализованы экспериментально [19, 20].

© Р.А. Торгашов, А.И. Бенедик, Н.М. Рыскин

С ростом напряжения стартовый ток нарастает примерно по линейному закону (действительно, параметр усиления Пирса зависит от отношения этих двух величин). В области низких напряжений $V_0 < 1$ kV ток, наоборот, начинает нарастать с уменьшением напряжения, что объясняется резким увеличением параметра ПЗ (см. рис. 3, *c*). Частота генерации оказывается примерно на 0.5 GHz ниже частоты синхронизма (см. рис. 2, *b*).

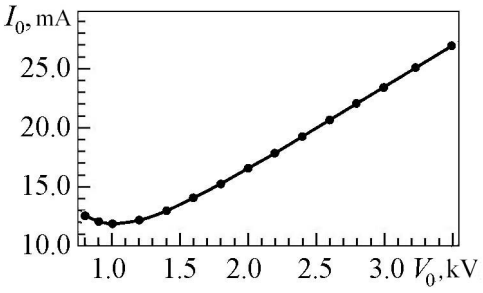

Рис. 4. Зависимость стартового тока от напряжения пучка

Fig. 4. Start-oscillation current vs beam voltage

На рис. 5, *a* приведены зависимости выходной мощности от времени, иллюстрирующие процессы установления колебаний при различных токах пучка и напряжении $V_0 = 2.5$ kV. При токе $I_0 = 25$ mA, что незначительно превышает порог генерации, время установления колебаний составляет около 25 ns. С ростом тока время установления колебаний уменьшается, а мощность увеличивается. Переходный процесс начинает носить осциллирующий характер. Как известно, при большом превышении порога генерации в ЛОВ реализуются автомодуляционные и хаотические режимы генерации [15, 16, 21, 22]. Однако в ходе проведенных расчетов даже при увеличении тока свыше 100 mA подобные режимы не наблюдались, то есть имеет место подавление автомодуляции пространственным зарядом [15, 16].

Частота генерации при данном значении напряжения примерно равна 72 GHz. С ростом тока она постепенно уменьшается (эффект электронного смещения частоты), однако это уменьшение незначительно.

На рис. 5, *b* построены графики зависимости мощности от тока пучка при трех различных значениях напряжения. Видно, что с ростом тока мощность растет примерно по линейному закону, причем бóльшим напряжениям соответствует бóльшая максимальная мощность. Это, очевидно, обусловлено тем, что с ростом напряжения увеличивается параметр Пирса C, а параметр ПЗ уменьшается (см. рис. 3). В целом, при разумных значениях тока, не превышающих 50 mA, выходная мощность составляет 1–2 W.

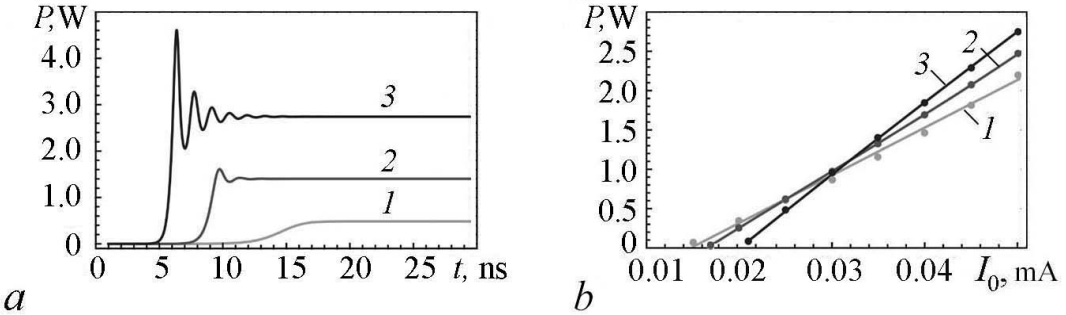

Рис. 5. *a* – пример установления колебаний в ЛОВ-генераторе при ускоряющем напряжении $V_0 = 2.5$ kV и токах I_0: 25 mA (кривая *1*), 35 mA (кривая *2*), 50 mA (кривая *3*). *б* – зависимости выходной мощности от тока при различных напряжениях V_0: 1.5 kV (кривая *1*), 2.0 kV (кривая *2*), 2.5 kV (кривая *3*)

Fig. 5. *a* – time histories of the BWO output power at voltage $V_0 = 2.5$ kV and beam current I_0: 25 mA (curve *1*), 35 mA (curve *2*), 50 mA (curve *3*). *б* – output power vs beam current at voltage V_0: 1.5 kV (curve *1*), 2.0 kV (curve *2*), 2.5 kV (curve *3*)

Заключение

В настоящей работе представлены результаты компьютерного моделирования ЛОВ-генератора средней части миллиметрового диапазона (60–75 GHz) с ленточным электронным пучком и планарной ЗС типа «встречные штыри» на диэлектрической подложке. Поскольку ЗС обладает большим замедлением, генератор является относительно низковольтным: рабочий диапазон напряжений составляет 1–3 kV. Проведенные расчеты показывают, что для ЗС из 50 периодов самовозбуждение происходит при значениях плотности тока 50–100 A/cm^2, что достижимо для существующих термоэмиссионных катодов. При токах, не превышающих 50 mA, выходная мощность достигает 1–2 W. Исследованная в данной работе ЛОВ может быть использована в качестве генератора входного сигнала для усилителя на основе лампы бегущей волны с планарной ЗС [7].

Авторы благодарны А.Г. Рожнёву, Г.В. Торгашову и Н.И. Синицыну за полезные советы и обсуждение результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-12-01160).

Библиографический список

1. *Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sokolov D.V., Trubetskov D.I., Han S.T., Kim J.I., Park G.S.* Novel concepts of vacuum microelectronic microwave devices with field emitter cathode arrays // Physics of Plasmas. 2002. Vol. 9, No. 9. P. 4020–4027.
2. *Ives R.L.* Microfabrication of high-frequency vacuum electron devices // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32, No.3. P. 1277–1291.
3. *Srivastava V.* THz vacuum microelectronic devices // J. Physics: Conf. Series. 2008. Vol. 114, No.1. 012015.
4. *Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.S., Park J.H., Temkin R.J.* Vacuum electronic high power terahertz sources // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. Vol. 1, No.1. P. 54–75.
5. *Гуляев Ю.В., Жбанов А.И., Захарченко Ю.Ф., Нефедов И.С., Синицын Н.И., Торгашов Г.В.* Планарные замедляющие системы миниатюрных электровакуумных СВЧ приборов // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 12. С. 2049–2058.
6. *Синицын Н.И., Гуляев Ю.В., Девятков Н.Д., Голант М.Б., Алексеенко А.М., Захарченко Ю.Ф., Торгашов Г.В.* Возможности вакуумной микроэлектроники на пути к построению СВЧ вакуумных интегральных схем // Радиотехника. 1999. № 4. С. 8–17.
7. *Бенедик А.И., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Синицын Н.И., Торгашов Г.В., Шалаев П.Д.* Разработка планарных замедляющих систем на диэлектрических подложках для приборов вакуумной микроэлектроники миллиметрового и субмиллиметрового диапазона // Радиотехника. 2016. № 7. С. 47–52.
8. *Benedik A.I., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Torga-*

© *Р.А. Торгашов, А.И. Бенедик, Н.М. Рыскин*

shov R.A. Planar V-band slow-wave structures for low-voltage tubes with sheet electron beam// Abstracts of the 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2017), London, United Kingdom 24–26 April 2017.

9. *Shen F., Wei Y.-Y., Xu X., Liu Y., Yin H.-R., Gong Y.-B., Wang W.-X.* 140-GHz V-shaped microstrip meander-line traveling wave tube // J. Electromagnetic Waves and Applications. 2012. Vol. 26, No.1. P. 89–98.
10. *Sumathy M, Augustin D, Datta S.K., Christie L., Kumar L.* Design and RF characterization of W-band meander-line and folded-waveguide slow-wave structures for TWTs // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. Vol. 60, No.5. P. 1769–1775.
11. *Bai N., Shen M., Sun X.* Investigation of microstrip meander-line traveling-wave tube using EBG ground plane // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. Vol. 62, No.5. P. 1622–1627.
12. *Ulisse G., Krozer V.* Investigation of a planar metamaterial slow wave structure for traveling wave tube applications // Abstracts of the 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2017), London, United Kingdom 24–26 April 2017.
13. *Shaomeng W., Aditya S.* A microfabricated V-shaped microstrip meander-line slow-wave structure // Abstracts of the 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2017), London, United Kingdom 24–26 April 2017.
14. *Galdetskiy A., Rakova E.* New slow wave structure for W-band TWT // Abstracts of the 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2017), London, United Kingdom 24–26 April 2017.
15. *Безручко Б.П., Булгакова Л.В., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* Экспериментальное и теоретическое исследование стохастических автоколебаний в лампе обратной волны // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (5-я зимняя школа-семинар инженеров). Кн. 5. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1980. С. 25–77.
16. *Кузнецов С.П.* Нелинейная динамика лампы обратной волны: Автомодуляция, мультистабильность, контроль // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2006. Т. 14, № 4. С. 3–35.
17. *Han S.T., Jang K.H., So J.K., Park G.S., Ryskin N.M.* Enhancement of backward-wave interaction by external feedback // Phys. Plasmas. 2005. Vol. 12, No.8. 083103.
18. *Baig A., Gamzina D., Kimura T., Atkinson J., et al.* Performance of a nano-CNC machined 220-GHz traveling wave tube amplifier // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. Vol. 64, No.5. P. 2390–2397.
19. *Каретникова Т.А., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Синицын Н.И., Григорьев Ю.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д.* Моделирование лампы бегущей волны субтерагерцевого диапазона с замедляющей системой типа сдвоенной гребенки и ленточным электронным пучком // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 1. С. 54–60.
20. *Бурцев А.А., Григорьев Ю.А., Журавлев С.Д., Навроцкий И.А., Сахаджи Г.В., Шумихин К.В.* Исследование электронной пушки с компрессией ленточного потока для вакуумных усилителей терагерцевого диапазона // Радиотехника. 2016. № 7. С. 97–100.
21. *Рыскин Н.М., Титов В.Н.* О сценарии перехода к хаосу в однопараметрической

модели лампы обратной волны // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т. 6, № 1. С. 75–92.

22. *Рыскин Н.М., Титов В.Н.* Исследование автомодуляционных режимов колебаний в релятивистской лампе обратной волны // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 6. С. 566–572.

References

1. Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sokolov D.V., Trubetskov D.I., Han S.T., Kim J.I., Park G.S. Novel concepts of vacuum microelectronic microwave devices with field emitter cathode arrays. *Physics of Plasmas*. 2002. Vol. 9, No.9. P. 4020–4027.
2. Ives R.L. Microfabrication of high-frequency vacuum electron devices. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2004. Vol. 32, No.3. P. 1277–1291.
3. Srivastava V. THz vacuum microelectronic devices. *J. Physics: Conf. Series.* 2008. Vol. 114, No.1. 012015.
4. Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.S., Park J.H., Temkin R.J. Vacuum electronic high power terahertz sources. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1, No.1. P. 54–75.
5. Gulyaev Yu.V., Zhbanov A.I., Zakharchenko Yu.F., Nefedov I.S., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V. Planar slow-wave systems for miniature electrovacuum microwave devices. *Radiotekhnika i Elektronika.* 1994. Vol. 39, No.12. P. 2049–2058 (In Russian).
6. Sinitsyn N.I., Gulyaev Yu.V., Devjatkov N.D., Golant M.B., Alekseyenko A.M., Zakharchenko Yu.F., Torgashov G.V. Potentials of vacuum microelectronics on the way to constructing microwave vacuum integrated circuits. *Radiotekhnika.* 1999. No.4. P. 8–17 (In Russian).
7. Benedik A.I., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Shalaev P.D. Development of planar slow-wave structures on dielectric substrates for millimeter and submillimeter wave vacuum microelectronic devices. *Radiotekhnika.* 2016. № 7. С. 47–52 (In Russian).
8. Benedik A.I., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Torgashov R.A. Planar V-band slow-wave structures for low-voltage tubes with sheet electron beam. *Abstracts of the 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference* (*IVEC 2017*), London, United Kingdom 24–26 April 2017.
9. Shen F., Wei Y.-Y., Xu X., Liu Y., Yin H.-R., Gong Y.-B., Wang W.-X. 140-GHz V-shaped microstrip meander-line traveling wave tube. *J. Electromagnetic Waves and Applications.* 2012. Vol. 26, No.1. P. 89–98.
10. Sumathy M., Augustin D., Datta S.K., Christie L., Kumar L. Design and RF characterization of W-band meander-line and folded-waveguide slow-wave structures for TWTs. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2013. Vol. 60, No.5. P. 1769–1775.
11. Bai N., Shen M., Sun X. Investigation of microstrip meander-line traveling-wave tube using EBG ground plane. *IEEE Trans. Electron Devices.* 2015. Vol. 62, No.5. P. 1622–1627.
12. Ulisse G., Krozer V. Investigation of a planar metamaterial slow wave structure for

© *Р.А. Торгашов, А.И. Бенедик, Н.М. Рыскин*

traveling wave tube applications. *Abstracts of the 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference* (*IVEC 2017*), London, United Kingdom 24–26 April 2017.

13. Shaomeng W., Aditya S. A microfabricated V-shaped microstrip meander-line slow-wave structure. *Abstracts of the 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference* (*IVEC 2017*), London, United Kingdom 24–26 April 2017.
14. Galdetskiy A., Rakova E. New slow wave structure for W-band TWT. *Abstracts of the 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference* (*IVEC 2017*), London, United Kingdom 24–26 April 2017.
15. Bezruchko B.P., Bulgakova L.V., Kuznetsov S.P., Trubetskov D.I. Experimetal and theoretical study of stochastic self-oscillations in a backward-wave oscillator. *Lectures on Microwave Electronics and Radiophysics* (*Proc. of* 5th *Winter School-Seminar*). Saratov: Saratov University Press, 1980. Vol. 5. P. 25–77 (In Russian).
16. Kuznetsov S.P. Nonlinear dynamics of backward-wave tube: Self-modulation, multi-stability, control. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2006. Vol. 14, No.4. P. 3–35 (In Russian).
17. Han S.T., Jang K.H., So J.K., Park G.S., Ryskin N.M. Enhancement of backward-wave interaction by external feedback. *Phys. Plasmas.* 2005. Vol. 12, No.8. 083103.
18. Baig A., Gamzina D., Kimura T., Atkinson J., et al. Performance of a nano-CNC machined 220-GHz traveling wave tube amplifier. *IEEE Trans. Electron Devices.* 2017. Vol. 64, No.5. P. 2390–2397.
19. Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I., Grigoriev Yu.A., Burtsev A.A., Shalaev P.D. Modeling a subterahertz traveling wave tube with a slow-wave structure of the double grating type and a sheet electron beam. *J. Comm. Technol. Electronics.* 2016. Vol. 61, № 1. С. 50–55.
20. Burtsev A.A., Grigoriev Yu.A., Zhuravlev S.D., Navrotsky I.A., Sakhadzhi G.V., Shumikhin K.V. Study of electron gun with converging sheet beam for vacuum amplifiers at terahertz frequencies. *Radiotekhnika.* 2016. No 7. P. 97–100 (In Russian).
21. Ryskin N.M., Titov V.N. On the transition to chaos scenario in one parameter model of backward wave oscillator. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 1998. Vol. 6, No. 1. P. 75–92 (In Russian).
22. Ryskin N.M., Titov V.N. Self-modulation oscillatory modes in a relativistic backward-wave oscillator. *Radiophysics and Quantum Electronics.* 1999. Vol. 42, No. 6. P. 500–505.

Торгашов Роман Антонович – родился в Саратове (1997). Окончил МОУ «Лицей прикладных наук» Саратова (2014) и поступил на факультет нелинейных процессов Саратовского госуниверситета. С 2016 года работает в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники РАН. Области научных интересов: приборы вакуумной электроники терагерцевого диапазона, вакуумная микроэлектроника. Имеет две публикации тезисов докладов на научных конференциях.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Россия, 410019 Саратов, Зелёная, 38
Саратовский филиал Института радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова РАН
E-mail: torgashovra@gmail.com

© *Р.А. Торгашов, А.И. Бенедик, Н.М. Рыскин*

Бенедик Андрей Иванович – родился в Мукачево Закарпатской области Украины (1990). Окончил МОУ «Лицей прикладных наук» Саратова (2008) и поступил на факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. В 2013 году с отличием защитил диплом по специальности «Физика открытых нелинейных систем». Аспирант 4-го года обучения кафедры нелинейной физики СГУ. С 2013 года также работает инженером АО «НПП «Алмаз» Саратова. Область научных интересов: исследование приборов вакуумной микроэлектроники О-типа с пространственно-развитыми замедляющими системами, численное моделирование нелинейных явлений в приборах вакуумной СВЧ-электроники. Автор ряда публикаций по данным направлениям.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
andrej-benedik@yandex.ru

Рыскин Никита Михайлович окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1991). Защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата (1996) и доктора физико-математических наук (2005). С 1997 года работает на факультете нелинейных процессов СГУ, профессор, с 2014 года заведующий кафедрой нелинейной физики. С 2013 года работает старшим научным сотрудником Саратовского филиала ИРЭ РАН. Область научных интересов: нелинейная теория колебаний и волн, приборы вакуумной электроники ТГц-диапазона, вакуумная микроэлектроника. Имеет более 200 научных публикаций по указанным выше направлениям.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Россия, 410019 Саратов, Зелёная, 38
Саратовский филиал Института радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова РАН
E-mail: RyskinNM@info.sgu.ru

© *Р.А. Торгашов, А.И. Бенедик, Н.М. Рыскин*