

## **Планарные замедляющие системы для ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн**

Богомолова Е. А., Галдецкий А. В., Савин А. Н.

*АО «Научно-производственное предприятие “Исток” имени А. И. Шокина»  
ул. Вокзальная, 2А, г. Фрязино, Московская обл., 141190, Российская Федерация  
galdetskiy@istokmw.ru*

Получено: 22 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

**Аннотация:** Рассмотрены достижения, проблемы и особенности в разработке планарных замедляющих систем для ЛБВ миллиметрового диапазона. Обзор характеристик планарных замедляющих систем для ЛБВ мм-диапазона, изготавливаемых с помощью технологии фотолитографии, предоставляет разработчикам возможность выбора высокотехнологичных конструкций замедляющих систем планарного типа для создания эффективных широкополосных ЛБВ.

**Ключевые слова:** замедляющая система, электронный пучок, алмаз, ЛБВ, дисперсия, токооседание.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Богомолова Е. А., Галдецкий А. В., Савин А. Н. Планарные замедляющие системы для ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 1. С. 54–69.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Богомолова, Е. А. Планарные замедляющие системы для ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн / Е. А. Богомолова, А. В. Галдецкий, А. Н. Савин // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 1. — С. 54–69.

### **1. Введение**

Развитие СВЧ-электроники идет по пути продвижения в миллиметровый и субмиллиметровый (терагерцовый) диапазоны, открывая широкие перспективы для военных и гражданских систем радиолокации и связи (включая 5G), высокоточного оружия, систем радиовидения, биомедицинских приложений и т. д. [1–4].

В мм-диапазоне и на более высоких частотах твердотельные приборы уступают электровакуумным приборам (ЭВП) по уровню радиационной и температурной стойкости, выходной мощности, усилению и КПД, по стоимости «единицы» мощности, широкополосности и помехозащищенности (рис. 1). Учитывая тенденции, такое положение дел сохранится (в отличие от сантиметрового диапазона) еще на многие годы.

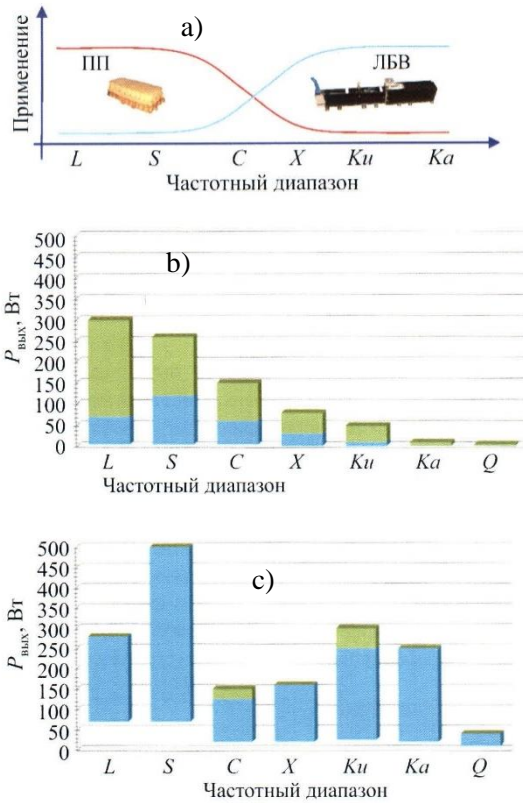


Рис. 1. а) конкуренция твердотельных и электровакуумных усилителей; уровень развития в Европе усилителей космического назначения: б) электровакуумных на основе ЛБВ и в) полупроводниковых.

Fig. 1. a) competition between solid-state and electrovacuum amplifiers; the level of development in Europe of amplifiers for space applications: b) vacuum amplifiers and c) solid-state amplifiers

Появление в последние годы новых материалов, методов моделирования и проектирования приборов, технологических процессов, электронных компонентов, радиоэлектронной аппаратуры, систем и комплексов на

их основе привели к созданию ряда миниатюрных ЛБВ  $W$ -диапазона, обладающих высокими параметрами [5—32].

Среди них особый интерес у разработчиков вызывают ЛБВ с планарными замедляющими системами (ЗС) [33—35]. Преимуществами этих ЛБВ перед обычными являются малый вес и размеры, повышенная устойчивость к ударам и вибрации, низкие производственные затраты при изготовлении прибора [36—38]. Кроме того, планарная технология обеспечивает высокую точность изготовления мелкоструктурных ЗС, удовлетворяющую жестким допускам для ламп, работающих в  $W$ -диапазоне. Планарные технологии позволяют изготавливать сложные ЗС, которые трудно выполнить обычными методами.

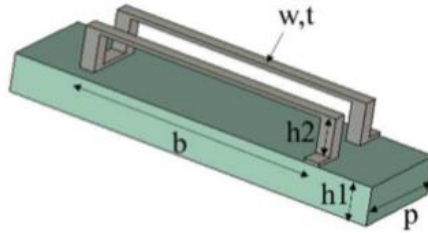
Распространению ЛБВ с планарными ЗС препятствовал ряд проблем. Классическая планарная ЗС изготавливается нанесением тонкой пленки металла на диэлектрическую подложку с последующей фотолитографией. В такой конструкции предполагается использование ленточного электронного потока. Однако транспортировка сильноточных ленточных пучков в магнитном поле затруднена из-за  $S$ -образного изгиба краев ленты при движении электронов к коллектору, что приводит к значительной деградации токопрохождения. Кроме того, близкое расположение пучка к поверхности диэлектрика приводит к ее зарядке и процессам вторичной эмиссии, что также влияет на токопрохождение. Для уменьшения эффекта  $S$ -образного загиба краев ленты используется магнитное поле большой величины, что в свою очередь существенно увеличивает массогабаритные параметры лампы и ее стоимость.

Для отвода тепла от элементов ЗС приходится располагать подложку на стенке волновода, что резко увеличивает диэлектрическую нагрузку и ухудшает сопротивление связи ЗС. Для устранения указанных недостатков в ряде теоретических работ [33—35, 39, 40] предлагаются новые конструктивные решения.

## **2. Перспективные конструкции планарных замедляющих систем для ЛБВ $W$ -диапазона**

В работе [33] предлагается конструкция ЗС, центральная часть проводников которой приподнята на высоту 50 мкм относительно диэлектрической подложки из кварца с  $\epsilon = 3.75$  (рис. 2).

Закрепление проводника на подложке в узкой части меандра позволило увеличить сопротивление связи более чем в 2 раза относительно классической конструкции, при этом напряжение синхронизма увеличилось не более, чем на 10 % (рис. 3).



Parameter	b	w	h1	h2	p	t
Value(mm)	0.35	0.02	0.05	0.05	0.14	0.005

Рис. 2. Макет одного периода планарной ЗС с приподнятыми проводниками.  
 Fig. 2. Model of one period of a planar slow-wave system with elevated conductors

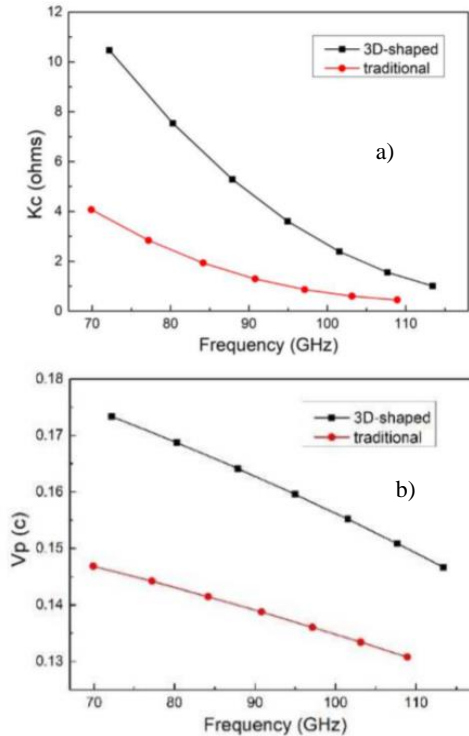


Рис. 3. АЧХ сопротивления связи (а) и фазовой скорости (б) в полосе прозрачности ЗС: для новой конструкции (черная кривая) и классической (красная кривая).

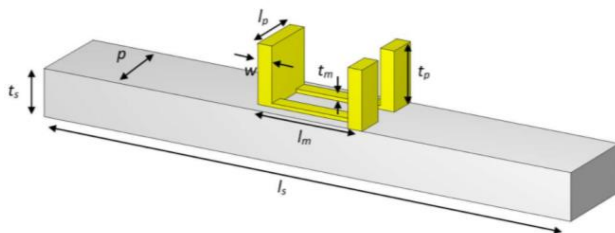
Fig. 3. Frequency response of the coupling resistance (a) and phase velocity (b) in the slow-wave system transparency band: for the new design (black curve) and classical (red curve)

Авторы представили расчет выходной мощности ЛБВ с новой планарной ЗС в полосе частот 80—95 ГГц с ускоряющим напряжением 6.7 кВ и током 0.1 А. Мощность составила 28 Вт, усиление — 24 дБ. Сопротивление связи ЗС достаточно велико благодаря низкой диэлектрической проницаемости кварца, но средняя мощность мала из-за его низкой теплопроводности.

В работе [34] анализируется возможность создания ЛБВ в диапазоне 71—76 ГГц для спутниковой линии связи, в которой проводники ЗС которой выполнены в виде меандра с помощью фотолитографии (рис. 4). В качестве материала проводников меандра используется золото, а подложка — оксид алюминия с диэлектрической проницаемостью 9.9. Сопротивление связи ЗС имеет величину более 10 Ом в полосе частот 71—76 ГГц (рис. 5).

Расчетные выходная мощность и коэффициент усиления ЛБВ с ускоряющим напряжением 6.5 кВ и током катода 40 мА составили более 20 Вт и 26 дБ.

Авторы работы [35] исследуют возможность создания ЛБВ на частоте 160 ГГц с ускоряющим напряжением 14.6 кВ с планарной ЗС типа двойной медный меандр на подложке из кварца (рис. 6).



Parameter	$l_m$	$t_m$	$w$	$l_p$	$t_p$	$p$	$l_s$	$t_s$
Value ( $\mu\text{m}$ )	320	10	40	160	150	240	1500	127

Рис. 4. Макет одного периода планарной замедляющей системы с высотой периферийной части меандра 150 мкм.

Fig. 4. Model of one period of a planar slow-wave system with a height of the peripheral part of the meander of 150  $\mu\text{m}$

Подробно исследована технология изготовления пленочной ЗС, в которой используются процессы, основанные на магнетронном распылении, УФ-литографии и травлении ионным пучком аргона. Процесс осаждения занимает в общей сложности 40 минут, включая вакуумную откачку. Фотография изготовленного образца представлена на рис. 7.

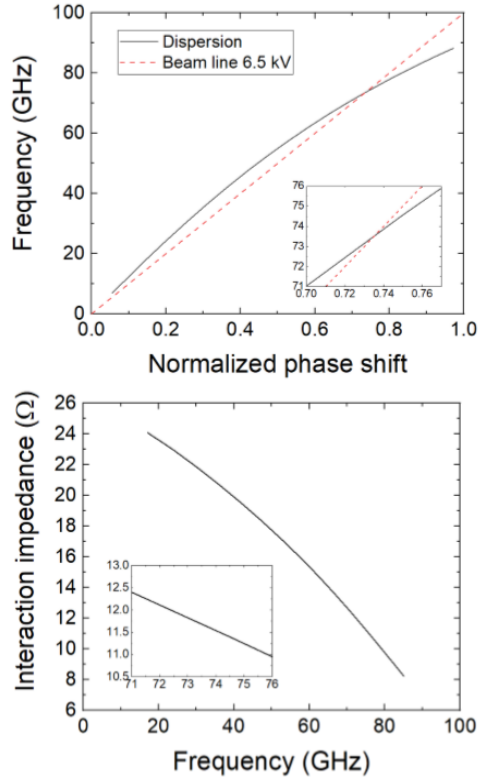
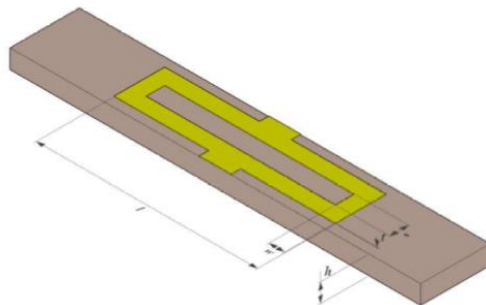


Рис. 5. Диаграмма Бриллюэна и АЧХ сопротивления связи в полосе прозрачности.  
 Fig. 5. Brillouin diagram and frequency response of interaction impedance in the transparency band



Параметр	$l$	$h$	$t$	$s$	$w$
Значение, мкм	160	25	1	15	24

Рис. 6. Макет одного периода планарной ЗС с двойным меандром.  
 Fig. 6. Model of one period of a planar slow-wave system with a double meander

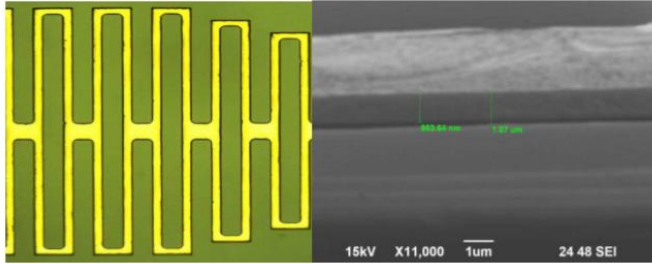
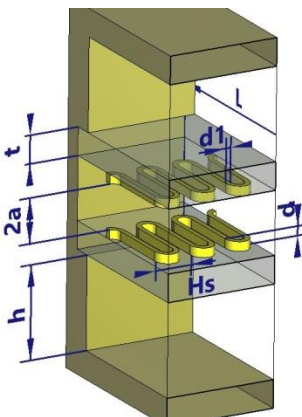


Рис. 7. Фотография планарной ЗС в оптическом (слева) и электронном (справа) микроскопе.  
Fig. 7. Photograph of a planar slow-wave system from an optical (FL) and electron (FR) microscope

В рассмотренных конструкциях ЗС решалась проблема увеличения сопротивления связи в рабочей полосе частот. Однако вопрос токоотседа-ния электронного потока на диэлектрическую подложку с последующей ее зарядкой в данных конструкциях остается нерешенным.

### 3. Замедляющая система типа «меандр» на подвешенной подложке из CVD алмаза

Разработанная авторами ЗС планарного типа содержит волновод, в котором размещена диэлектрическая подложка с периодической системой проводников, имеющих топологию меандра [39—40]. Вторая подложка с идентичной системой проводников располагается параллельно первой, причем между проводниками подложек образуется пролетный канал вдоль продольной оси волновода (рис. 8).



Период $H_s$ , мкм	190
Ширина волновода $L$ , мм	0.8
Высота пролетного канала $2a$ , мкм	240
Толщина алмазной подложки $t$ , мкм	150
Ширина проводников $dl$ , мкм	25
Толщина проводников $d$ , мкм	50
Расстояние от внутренней стенки волно-вода $h$ , мм	0.5
Ширина электронного пучка, мкм	400
Высота электронного пучка, мкм	108

Рис. 8. Конструкция ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой из CVD алмаза.

Fig. 8. Design of a meander-type slow-wave system with a suspended CVD diamond substrate

Ширина каждой подложки не превышает  $\lambda/2$ , где  $\lambda$  — длина волны. Подложки закрепляются на расстоянии  $h$  от внутренней стенки волновода. Величина  $h$  выбирается из условия  $h \geq \lambda/(\epsilon\pi\sqrt{n^2-1})$ , где  $n$  — коэффициент замедления ( $n = c/v_\phi$ ),  $c$  — скорость света,  $v_\phi$  — фазовая скорость волны в системе. Благодаря подвешенным подложкам заметно повышается сопротивление связи, а для обеспечения требуемого теплоотвода в качестве материала диэлектрических подложек предложено использовать CVD алмаз.

В рассматриваемой ЗС предполагается использовать ленточный ЭП с сечением  $400 \times 108$  мкм. С учетом заданных размеров поперечного сечения пучка и технологических возможностей изготовления высота пролетного канала была выбрана  $2a = 240$  мкм.

В результате численного моделирования установлено, что для предотвращения токооседания ЭП на поверхность диэлектрика толщина проводника  $d$  должна быть не менее  $p_0/17$ , где  $p_0$  — расстояние между соседними проводниками на подложке. Это обеспечивает отсутствие накопления заряда в подложке, появления паразитных электростатических полей и процессов вторичной эмиссии.

Для снижения вызываемой диэлектрической подложкой нагрузки на проводники, приводящей к уменьшению концентрации электрического поля в области пучка, и с учетом имеющихся технологических возможностей была выбрана минимально возможная толщина подложки  $t = 150$  мкм.

На рис. 9 представлены: диаграмма Бриллюэна, АЧХ замедления и сопротивления связи планарной ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой из CVD алмаза.

В диапазоне изменения фазового сдвига от  $0 \leq \phi \leq \pi$  синхронизм обеспечивается между электронным пучком и 0-й пространственной гармоникой 1-й моды (рис. 9b), которая распространяется в направлении движения электронного пучка при ускоряющем напряжении 15.6 кВ и имеет более высокое сопротивление связи (рис. 9c) по сечению электронного пучка, чем другие пространственные гармоники, что снижает возможность возникновения паразитной генерации.

В качестве примера применения планарной ЗС на подвешенной алмазной подложке была рассчитана односекционная «прозрачная» ЛБВ с заданным усилением не более 16 дБ при плотности тока с катода  $100$  А/см<sup>2</sup>. Результаты моделирования показали возможность достижения в мини-ЛБВ  $W$ -диапазона с планарной ЗС типа «меандр» на подвешенной подложке рабочей полосы 3 % при выходной непрерывной мощности более 35 Вт, усилении 15 дБ и ускоряющем напряжении всего 15.6 кВ.



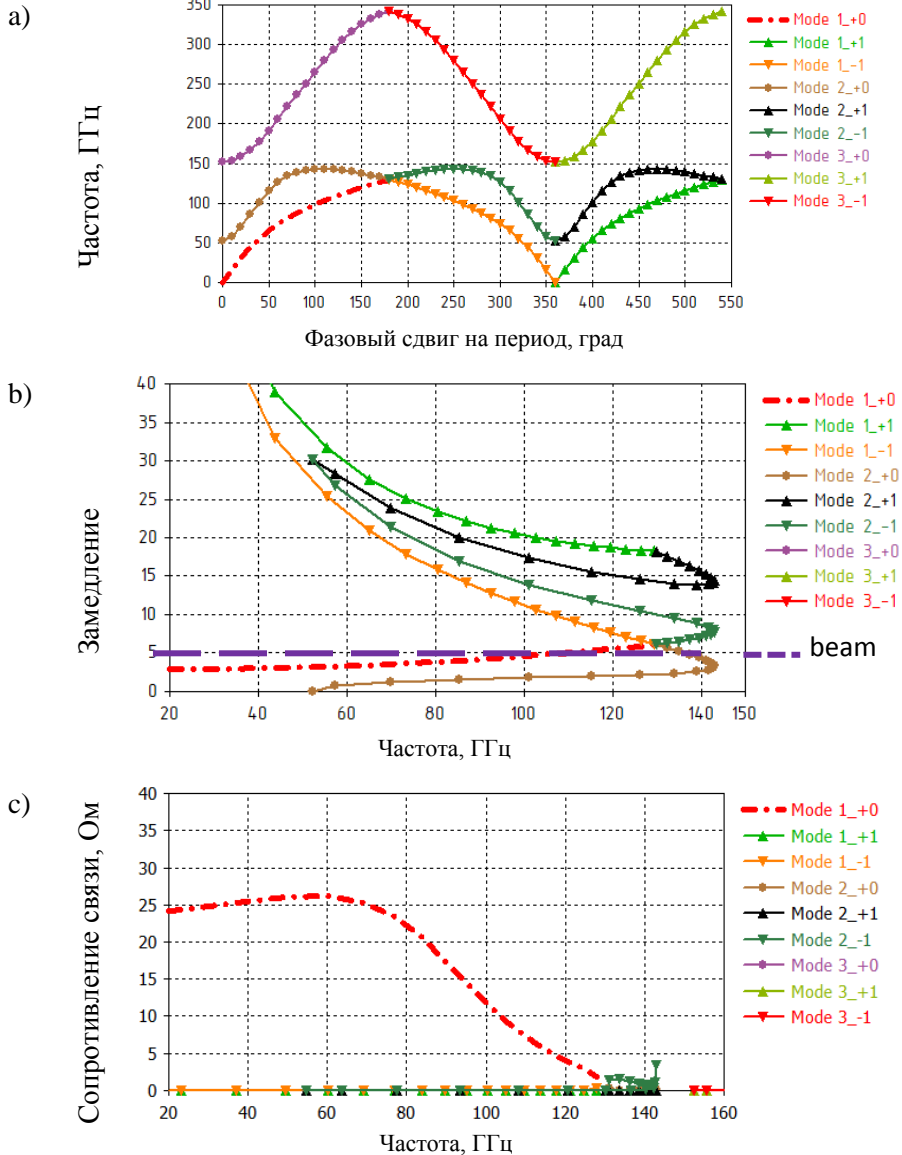


Рис. 9. Диаграмма Бриллюэна (а), АЧХ замедления (б) и сопротивления связи (с) планарной ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой.

Fig. 9. Brillouin diagram (a), frequency response of deceleration (b) and coupling resistance (c) for a planar earthing system of the “meander” type with a suspended substrate

## 4. Заключение

В данной работе представлены тенденции развития планарных ЗС для ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн. Показано, что продвижение в коротковолновую часть мм-диапазона в значительной мере связано с поиском и реализацией эффективных конструкций замедляющих систем и технологий их изготовления.

Представленный в статье обзор характеристик планарных ЗС для ЛБВ мм-диапазона, изготавливаемых с помощью технологии фотолитографии, дает разработчикам возможность выбора высокотехнологичных конструкций ЗС планарного типа для создания эффективных широкополосных ЛБВ.

## Список литературы

1. Andre Frederic [et al.] Technology, Assembly, and Test of a W-band TWT for New 5 G High-Capacity Networks // IEEE Transactions on electron devices. 2020. Vol. 67, no. 7. P. 2919—2924.
2. Glyavin M. Y., Idehara T., Sabchevski S. P. Development of THz gyrotrons at IAP RAS and FIR UF and their applications in physical research and highpower THz technologies // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2015. Vol. 5, no. 5. P. 788—797.
3. Dayton J. A., Kory C. L., Mearini G. T. Microfabricated mm-wave TWT platform for wireless backhaul. In: Abstracts of the Sixteenth IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC2015). (Beijing, China, April 27—29, 2015). P. 1—2.
4. Галдецкий А. В., Сапрынская Л. А., Соколова И. М., Натура И. П., Корчагин А. И. Мощная ЛБВ миллиметрового диапазона с прецизионной технологией изготовления согласующих элементов конструкции // Радиотехника. 2019. Т. 83, № 7 (10). С 73—82.
5. Wang J., Zhang D., Liu C. и др. UNIPIC code for simulations of high power microwave devices // Physics of Plasmas. 2009. Vol. 16, no 3. P. 0331081—03310810.
6. CST STUDIO SUITE — ELECTROMAGNETIC FIELD SIMULATION SOFTWARE. URL: [https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/?utm\\_source=cst.com&utm\\_medium=301&utm\\_campaign=cst](https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/?utm_source=cst.com&utm_medium=301&utm_campaign=cst) (дата обращения: 12.07.2021).
7. Understand, Predict and Optimize Physics-Based Designs and Processes with COMSOL Multiphysics. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (дата обращения: 15.09.2021).
8. Starinshak D. P., Smith N. D., Wilson J. D. Using COMSOL Multiphysics software to model anisotropic dielectric and metamaterial effects in folded-waveguide traveling-wave tube slow-wave circuits. In: IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC 2008. (Monterey, California April 22—24, 2008). P. 162—163.
9. HFSS 3D Electromagnetic Field Simulator for RF and Wireless Design URL: <https://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-HFSS> (дата обращения: 10.11.2021).
10. Antonsen T. M. Jr., Levush B. CHRISTINE : A Multifrequency Parametric Simulation Code for Traveling Wave Tube Amplifiers. Washington : NRL Internal report, 1997. 39 p.

11. Chernyavskiy I. A., Chernin D., Vlasov A. N. [at al.] Modeling of the wide-band coupled-cavity TWTS with the large-signal code TESLA-CC. In: Abstracts of IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS 2011). (Chicago, Illinois, USA, June 26—30, 2011). P. 1—1.
12. Chernyavskiy I. A., Cooke S. J., Vlasov A. N. [at al.] Parallel Simulation of Independent Beam-Tunnels in Multiple-Beam Klystrons Using TESLA // IEEE Transactions on Plasma Science. 2008. Vol. 36, no 3. P. 670—681.
13. Chernyavskiy I. A., Petillo J. J., Vlasov A. N. [at al.] End-to-end analysis using MICHELLE and TESLA codes. In: IEEE International Conference on Plasma Science — Abstracts. (ICOPS 2009). (San Diego, CA, USA, June 1—5, 2009). P. 1—1.
14. Chernyavskiy I. A., Vlasov A. N., Antonsen T. M. [at al.] Validation study of the TESLA model for extended interaction klystron // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2011). (Bangalore, Karnataka, India, Feb. 21—24, 2011). P. 89—90.
15. Chernyavskiy I. A., Vlasov A. N., Antonsen T. M. [at al.] Modeling of a G-band extended interaction klystron using the large-signal code TESLA // 35<sup>th</sup> International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010), (Rome, Italy, September 5—10, 2010). P. 1—2.
16. Chernyavskiy I. A., Vlasov A. N., Cooke S. J. [at al.] TESLA modeling of the linear-beam amplifiers. In: IEEE International Vacuum Electronics Conference — IVEC'09. (Rome, Italy, April 28—30, 2009). P. 121—122.
17. Cooke S. J., Vlasov A. N., Levush B. [at al.] GPU-accelerated 3D time-domain simulation of vacuum electron devices. In: IEEE International Vacuum Electronics Conference — IVEC 2011. (Bangalore, Karnataka, India, Feb. 21—24, 2011). P. 305—306.
18. Vlasov A. N., Antonsen T. M., Chernin D. [at al.] Simulation of microwave devices with external cavities using MAGY. In: Third IEEE International Vacuum Electronics Conference — IVEC 2002. (Monterey, California, USA, April 23—25, 2002). P. 79—80.
19. Vlasov A. N., Cooke S. J., Levush B. [at al.] 16.1 : 2D modeling of beam-wave interaction in coupled cavity TWT with TESLA. In: IEEE International Vacuum Electronics Conference — IVEC 2010. (Monterey, CA, USA, May 18—20, 2010). P. 405—406.
20. Borisov A. A., Budzinsky U. A., Bykovsky S. V. [at al.] The development of vacuum microwave devices in Istok. In: IEEE International Vacuum Electronics Conference — IVEC 2011. (Bangalore, Karnataka, India, Feb. 21—24, 2011). P. 437—438.
21. Dayton J. A., Kory C. L., Mearini G. T. Microfabricated mm-wave TWT platform for wireless backhaul. In: Abstracts of the Sixteenth IEEE International Vacuum Electronics Conference — IVEC2015. (Beijing, China, April 27—29, 2015). P. 1—2.
22. Zaginaylov G. I., Gandel Y. V., Kamyshan O. P. [at al.] Full-wave analysis of the field distribution of natural modes in the rectangular waveguide grating based on singular integral equation method // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30, no 3. P. 1151—1159.
23. Каретникова Т. А. Линейная теория многосекционных широкополосных ЛБВ с неоднородной спиральной замедляющей системой // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, № 6. С. 148—159.
24. Рожнёв А. Г., Рыскин Н. М., Каретникова Т. А. [и др.] Исследование характеристик замедляющей системы лампы бегущей волны миллиметрового диапазона с ленточным электронным пучком // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8. С. 601—613.
25. Бушуев Н. А. Расчет собственных мод диафрагмированного волновода для гиро-приборов с замедленными волнами. В кн.: Proceedings of the 4th IEEE Saratov — Penza Charter Workshop «Машинное проектирование в прикладной электродинамике и электронике». (Саратов, Россия, 26 сент. 1999). С. 87—91.

26. Rozhnev A. G., Ryskin N. M., Sokolov D. V. [at al.] New 2.5D code for modeling of nonlinear multisignal amplification in a wideband helix traveling wave tube // In: Fifth IEEE International Vacuum Electronics Conference, (Monterey, California, April 27—29, 2004). P. 144—145.
27. Гольденберг Б. Г. Базовые принципы LIGA-технологии  
URL: [www.ssrc.inp.nsk.su/CKP/lectons/Theory\\_of\\_LIGA-tecnology.pdf](http://www.ssrc.inp.nsk.su/CKP/lectons/Theory_of_LIGA-tecnology.pdf)  
(дата обращения: 10.11.2020).
28. Thevenoud J. M., Mercier B., Bourouina T. [at al.] DRIE TECHNOLOGY : FROM MICRO TO NANOAPPLICATIONS.  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/228781147\\_\(дата\\_обращения:\\_10.12.2017\)](https://www.researchgate.net/publication/228781147_(дата_обращения:_10.12.2017)).
29. Rai-Choudhury P., ed. MEMS and MOEMS Technology and Applications. SPIE PRESS BOOK, 2000. 528 p.
30. Siegel P. H. Terahertz technology // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, no 3. P. 910—928.
31. Carlsten B. E., Russell S. J., Earley L. M. [at al.] Technology development for a mm-wave sheet-beam traveling-wave tube // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. Vol. 33, no 1. P. 85—93.
32. Duo Xu, Wei Shao [et al.] A semi-analytic numerical algorithm of diamond pillbox windows for terahertz vacuum electron device applications // IEEE Electron Device Letters. 2021. Vol. 42, no. 2, P. 252—255.
33. Shangsong Xin, Yanyu Wei, Lingna Yue, Jin Xu, Hairong Yin, Wenxiang Wang, Research on a 3-D Microstrip Meander-line Slow-wave Structure Traveling Wave Tube. In: IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC 2021 (Virtual Event April 28—30, 2021). P. 58—59.
34. Juan Socuellamos, Rosa Letizia, Roberto Dionisio, Claudio Paoloni, Pillared Meander Line Slow Wave Structure for W-band Traveling Wave Tube. In: IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC 2021. (Virtual Event April 28—30 2021). P. 74—75.
35. Yang Xie, Ningfeng Bai, Xiaohan Sun, Pan Pan, Jun Cai, Jinjun Feng, Design and Fabrication of D-band Planar Double Microstrip Meander Line Slow Wave Structure. In : IEEE International Vacuum Electronics Conference — IVEC 2021. (Virtual Event April 28—30, 2021). P. 106—107.
36. Mannette R., Shaw B., Henry H., An M-type backward-wave oscillator with photocopied delay line // Electronics. 1966. Vol. 39, no. 4.
37. Printed-circuit TWT's promis cost cuts // Electronics. 1972. Vol. 45, no. 25. P. 35—36.
38. Scott A. W. Next in tubes the printed circuit TWT // Electronic Design. 1972. Vol. 20, no. 26. P. 28, 30.
39. Ракова Е. А. Проектирование ЛБВ W-диапазона с замедляющей системой на алмазном теплоотводе. В сб.: Научно-технический сборник «Успехи современной радиоэлектроники». 2016. № 2. С. 51.
40. Галдецкий А. В., Богомоллова Е. А. Замедляющая система планарного типа. Патент РФ № 2653573, приоритет от 06.03.2017 г.

### Информация об авторах

**Богомоллова Евгения Александровна**, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино.

**Галдецкий Анатолий Васильевич**, кандидат физико-математических наук, начальник отделения АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино.

**Савин Александр Николаевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник АО «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино.

# Planar Slow-Wave Structures for Millimeter Wave Band TWT

E. A. Bogomolova, A. V. Galdetskiy, and A. N. Savin

*Scientific and production enterprise “Istok” n. a. A. I. Shokin, JSC  
Vokzalnaya st., 2A, Fryazino, Moscow region, 141190, Russian Federation  
galdetskiy@istokmw.ru*

Received: May 22, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

**Abstract:** *Achievements, problems and features in the development of planar slow-wave systems for TWTs in the millimeter range are considered. In this article, a review of the characteristics of planar slow-wave systems for mm-band TWTs manufactured using photolithography is presented, which provides the opportunity for researchers and manufacturers to select high-tech designs of planar slow-wave systems for creating efficient broadband TWTs.*

**Keywords:** *slow-wave structure, electron beam, diamond, TWT, dispersion, beam intercept.*

**For citation (IEEE):** E. A. Bogomolova, A. V. Galdetskiy, and A. N. Savin, “Planar Slow-Wave Structures for Millimeter Wave Band TWT,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 54–69, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.1.04. (In Russ.).

## References

- [1] F. Andre, “Technology, Assembly, and Test of a W-Band Traveling Wave Tube for New 5G High-Capacity Networks,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 67, no. 7, pp. 2919–2924, 2020, doi: 10.1109/ted.2020.2993243.
- [2] M. Y. Glyavin, T. Idehara, and S. P. Sabchevski, “Development of THz Gyrotrons at IAP RAS and FIR UF and Their Applications in Physical Research and High-Power THz Technologies,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 5, no. 5, pp. 788–797, 2015, doi: 10.1109/thz.2015.2442836.
- [3] J. A. Dayton, C. L. Kory, and G. T. Mearini, “Microfabricated mm-wave TWT platform for wireless backhaul,” *2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2015, doi: 10.1109/ivec.2015.7223799.
- [4] A. V. Galdetskiy, L. A. Saprynskaya, I. M. Sokolova, I. P. Natura, and A. I. Korchagin, “Powerful millimeter wave TWT with precision manufacturing technology for matching structural elements,” *Radiotekhnika*, vol. 83, no. 7 (10), pp. 73–82, 2019. (In Russ.).
- [5] J. Wang, “UNIPICcode for simulations of high power microwave devices,” *Physics of Plasmas*, vol. 16, no. 3, p. 033108, 2009, doi: 10.1063/1.3091931.
- [6] “CST Studio Suite – Electromagnetic Field Simulation Software [Advertisement],” URL: [https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/?utm\\_source=cst.com&utm\\_medium=301&utm\\_campaign=cst](https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/?utm_source=cst.com&utm_medium=301&utm_campaign=cst) [Accessed July 12, 2021].

- [7] “*Understand, Predict and Optimize Physics-Based Designs and Processes with COMSOL Multiphysics* [Advertisement],” URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> [Accessed Sept. 15, 2021].
- [8] D. P. Starinshak, N. D. Smith, and J. D. Wilson, “Using COMSOL Multiphysics software to model anisotropic dielectric and metamaterial effects in folded-waveguide traveling-wave tube slow-wave circuits,” *2008 IEEE International Vacuum Electronics Conference*, 2008, doi: 10.1109/ivelec.2008.4556469.
- [9] “*HFSS 3D Electromagnetic Field Simulator for RF and Wireless* [Advertisement],” [Online]. <https://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-HFSS> [Accessed Nov. 10, 2021].
- [10] T. M. Antonsen, Jr., B. Levush, *CHRISTINE: A Multifrequency Parametric Simulation Code for Traveling Wave Tube Amplifiers*. Washington: NRL Internal report, 1997. 39 p.
- [11] I. A. Chernyavskiy, D. Chernin, A. Vlasov, B. Levush, T. Antonsen, and J. Legarra, “Modeling of the wide-band coupled-cavity TWTS with the large-signal code TESLA-CC,” *2011 Abstracts IEEE International Conference on Plasma Science*, 2011, doi: 10.1109/plasma.2011.5993000.
- [12] I. A. Chernyavskiy, “Parallel Simulation of Independent Beam-Tunnels in Multiple-Beam Klystrons Using TESLA,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 36, no. 3, pp. 670–681, 2008, doi: 10.1109/tps.2008.920270.
- [13] I. Chernyavskiy, J. Petillo, A. Vlasov, B. Levush, and E. Wright, “End-to-end analysis using MICHELLE and TESLA codes,” *2009 IEEE International Conference on Plasma Science – Abstracts*, 2009, doi: 10.1109/plasma.2009.5227554.
- [14] I. A. Chernyavskiy, “Validation study of the TESLA model for extended interaction klystron,” *2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2011, doi: 10.1109/ivec.2011.5746889.
- [15] I. A. Chernyavskiy, “Modeling of a G-band extended interaction klystron using the large-signal code TESLA,” *35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2010, doi: 10.1109/icimw.2010.5613043.
- [16] I. A. Chernyavskiy, “TESLA modeling of the linear-beam amplifiers,” *2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference*, 2009, doi: 10.1109/ivelec.2009.5193388.
- [17] S. J. Cooke, A. N. Vlasov, B. Levush, I. A. Chernyavskiy, and T. M. Antonsen, “GPU-accelerated 3D time-domain simulation of vacuum electron devices,” *2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2011, doi: 10.1109/ivec.2011.5746997.
- [18] A. Vlasov, T. Antonsen, D. Chernin, B. Levush, and E. Wright, “Simulation of microwave devices with external cavities using MAGY,” *Third IEEE International Vacuum Electronics Conference (IEEE Cat. No.02EX524)*, doi: 10.1109/ivelec.2002.999270.
- [19] A. N. Vlasov, S. J. Cooke, B. Levush, T. M. Antonsen, I. A. Chernyavskiy, and D. P. Chernin, “16.1: 2D modeling of beam-wave interaction in coupled cavity TWT with TESLA,” *2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2010, doi: 10.1109/ivelec.2010.5503379.
- [20] A. A. Borisov, “The development of vacuum microwave devices in Istok,” *2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2011, doi: 10.1109/ivec.2011.5747063.
- [21] J. A. Dayton, C. L. Kory, and G. T. Mearini, “Microfabricated mm-wave TWT platform for wireless backhaul,” *2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2015, doi: 10.1109/ivec.2015.7223799.
- [22] G. Zaginaylov, “Full-wave analysis of the field distribution of natural modes in the rectangular waveguide grating based on singular integral equation method,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 30, no. 3, pp. 1151–1159, 2002, doi: 10.1109/tps.2002.801613.

- [23] T. A. Karetnikova, "Linear theory of multisection broadband TWTs with an inhomogeneous spiral slow-wave system," *Izvestiya vuzov. Applied non-linear dynamics*, vol. 20, no. 6, pp. 148–159, 2012. (In Russ.).
- [24] A. G. Rozhnev, N. M. Ryskin, T. A. Karetnikova [et al.], "Investigation of the characteristics of the retarding system of a millimeter-wave traveling-wave lamp with a strip electron beam," *Izv. Vuzov. Radiophysics*, vol. 56, no. 8, pp. 601–613, 2013. (In Russ.).
- [25] N. A. Bushuev, "Calculation of eigenmodes of a diaphragmed waveguide for gyro-devices with slow waves," *Proceedings of the 4th IEEE Saratov – Penza Chapter Workshop "Machine Design in Applied Electrodynamics and Electronics" (Saratov, Russia, September 26, 1999)*, pp. 87–91. (In Russ.).
- [26] A. G. Rozhnev, N. M. Ryskin, D. V. Sokolov [at al.], "New 2.5D code for modeling of non-linear multisignal amplification in a wideband helix traveling wave tube," *Fifth IEEE International Vacuum Electronics Conference, (Monterey, California, April 27–29, 2004)*, pp. 144–145.
- [27] B. G. Goldenberg, "Basic principles of LIGA technology," URL: [www.ssrc.inp.nsk.su/CKP/lections/Theory\\_of\\_LIGA-tecnology.pdf](http://www.ssrc.inp.nsk.su/CKP/lections/Theory_of_LIGA-tecnology.pdf) [Accessed Oct. 11, 2020]. (In Russ.).
- [28] J. M. Thevenoud, B. Mercier, T. Bourouina [at al.], "Drie Technology: from Micro to Nanoapplications," URL: <https://www.researchgate.net/publication/228781147> [Accessed Oct. 12, 2017].
- [29] "MEMS and MOEMS Technology and Applications," 2000, doi: 10.1117/3.2265068.
- [30] P. Siegel, "Terahertz technology," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 3, pp. 910–928, 2002, doi: 10.1109/22.989974.
- [31] B. Carlsten, "Technology development for a mm-wave sheet-beam traveling-wave tube," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 33, no. 1, pp. 85–93, 2005, doi: 10.1109/tps.2004.841172.
- [32] D. Xu, "A Semi-Analytic Numerical Algorithm of Diamond Pillbox Windows for Terahertz Vacuum Electron Device Applications," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 42, no. 2, pp. 252–255, 2021, doi: 10.1109/led.2020.3045531.
- [33] S. Xin, J. Xu, H. Yin, Y. Wei, L. Yue, and W. Wang, "Research on a 3-D Microstrip Meander-line Slow-wave Structure Traveling Wave Tube," *2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2021, doi: 10.1109/ivec51707.2021.9722436.
- [34] J. M. Socuellamos, R. Letizia, R. Dionisio, and C. Paoloni, "Pillared Meander Line Slow Wave Structure for W-band Traveling Wave Tubes," *2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2021, doi: 10.1109/ivec51707.2021.9722426.
- [35] Y. Xie, N. Bai, X. Sun, P. Pan, J. Cai, and J. Feng, "Design and Fabrication of D-band Planar Double Microstrip Meander Line Slow Wave Structure," *2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, 2021, doi: 10.1109/ivec51707.2021.9722535.
- [36] R. Mannette, B. Shaw, and F. Hendry, "An m-type backward-wave oscillator with photocopied delay line," *1965 International Electron Devices Meeting*, 1965, doi: 10.1109/iedm.1965.187554.
- [37] "Printed-circuit TWT's promis cost cuts," *Electronics*, vol. 45, no. 25, pp. 35–36, 1972.
- [38] A. W. Scott, "Next in tubes the printed circuit TWT," *Electronic Design*, vol. 20, no. 26, pp. 28, 30, 1972.
- [39] E. A. Rakova, "Designing a W-band TWT with a moderating system based on a diamond heat sink," *Advances in modern radio electronics*, no. 2, p. 51, 2016. (In Russ.).
- [40] A. V. Galdetsky and E. A. Bogomolova, "Planar type slow-motion system," Patent of the Russian Federation No. 2653573, priority dated March 6, 2017. (In Russ.).

### **Information about the authors**

**Elena A. Bogomolova**, Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer of JSC “Scientific and production enterprise ‘Istok’ n. a. A. I. Shokin”, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.

**Anatoly V. Galdetskiy**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department of JSC “Scientific and production enterprise ‘Istok’ n. a. A. I. Shokin”, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.

**Alexandr N. Savin**, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of JSC “Scientific and production enterprise ‘Istok’ n. a. A. I. Shokin”, Fryazino, Moscow region, Russian Federation.