

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ МИНИАТЮРНОЙ МНОГОЛУЧЕВОЙ ЛАМПЫ
БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ W-ДИАПАЗОНА¹© 2023 г. Р. А. Торгашов^{a, b, *}, Д. А. Ножкин^{a, b}, А. В. Стародубов^{a, b}, Н. М. Рыскин^{a, b}^a Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019 Российская Федерация^b Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012 Российская Федерация*E-mail: torgashovra@gmail.com

Поступила в редакцию 17.05.2023 г.

После доработки 17.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Приведены результаты разработки замедляющей системы (ЗС) типа меандр с металлическими опорами для миниатюрной мощной лампы бегущей волны (ЛБВ) W-диапазона с двумя ленточными электронными пучками. С использованием трехмерного конечно-элементного программного пакета исследованы электродинамические параметры ЗС. Разработана двухсекционная модель ЛБВ-усилителя с разрывом для предотвращения самовозбуждения. Проведено трехмерное моделирование электронно-волнового взаимодействия. Получено, что при общем токе пучка 200 мА в линейном режиме коэффициент усиления превышает 30 дБ в полосе частот 95.4...97.75 ГГц, а выходная мощность в режиме насыщения достигает 120 Вт. Предложена технология изготовления ЗС на основе лазерной микрообработки тонких медных пластин. Изготовлены тестовые образцы ЗС и проведена их верификация с использованием оптической и сканирующей микроскопии.

DOI: 10.31857/S0033849423100182, EDN: YZMCNJ

ВВЕДЕНИЕ

Миниатюрные лампы бегущей волны (ЛБВ) являются перспективным прибором для освоения коротковолновой части миллиметрового или субтерагерцового (субТГц) диапазона [1]. Такие приборы при своих компактных размерах могут обеспечить высокие значения коэффициента усиления и выходной мощности в непрерывном режиме работы. На основе миниатюрных ЛБВ могут быть созданы источники когерентного излучения диапазона 100 ГГц и выше для систем беспроводной высокоскоростной передачи данных нового поколения и ряда других приложений. Ввиду сокращения поперечных размеров устройств субТГц-диапазона привлекли внимание приборы с пространственно-развитыми замедляющими системами (ЗС) и многолучевыми электронными пучками с большим поперечным сечением [2–6].

В данной работе рассматривается полосковая ЗС типа меандр с металлическими опорами для миниатюрной ЛБВ W-диапазона с двухлучевым электронным пучком. Проведено трехмерное мо-

делирование электродинамических параметров ЗС, а также моделирование режимов электронно-волнового взаимодействия. Также обсуждается технология изготовления ЗС с помощью лазерной микрообработки.

1. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

На рис. 1 показана схема ЗС, которая представляет собой металлический полосок в форме меандра с боковыми опорами. Она помещается в прямоугольный металлический волновод (на рисунке не показан). Размеры ЗС представлены в табл. 1. Предполагается, что два ленточных электронных пучка с поперечным сечением $w_b \times h_b = 1450 \times 100$ мкм² распространяются вдоль ЗС, причем расстояние от края пучков до поверхности металлического меандра составляет $h = 75$ мкм.

Расчет и оптимизация системы проводились на основе модели одного периода ЗС с граничными условиями Флоке с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics. На рис. 2 представлены результаты расчетов. В силу наличия в системе плоскости скользящей сим-

¹ Работа удостоена премии на 19-м конкурсе молодых ученых имени Ивана Анисимкина.

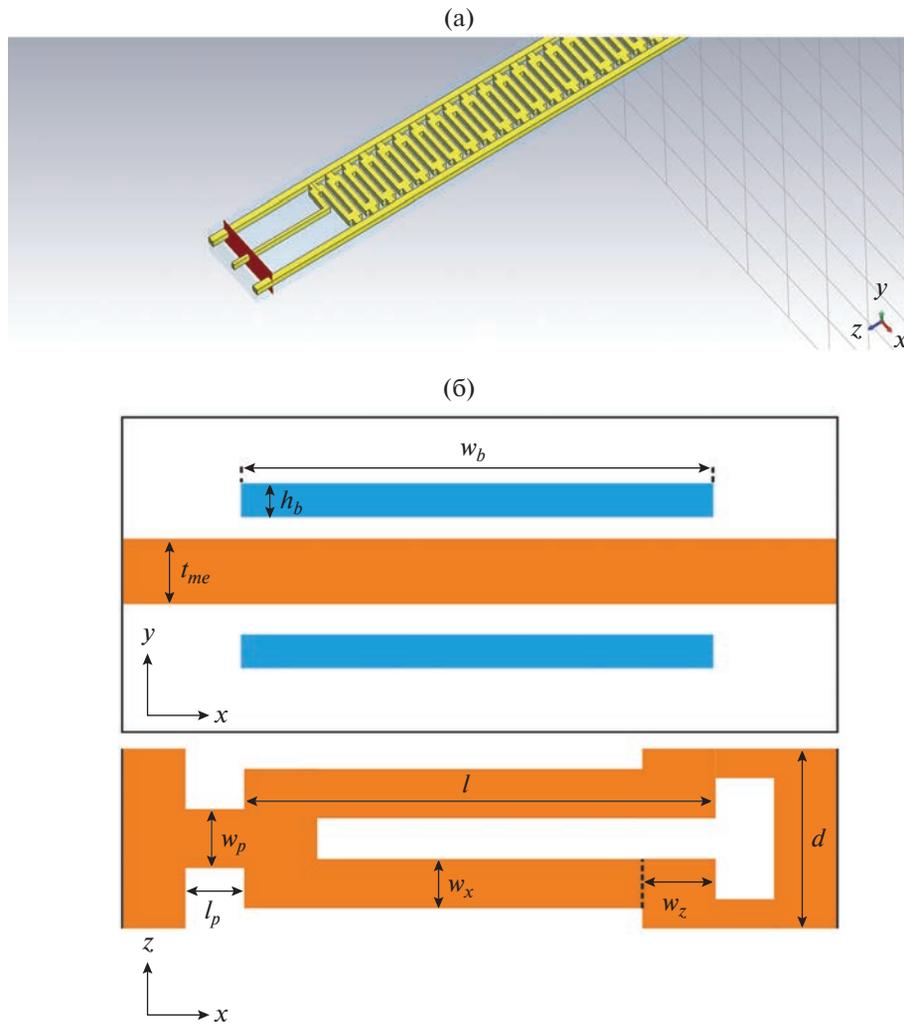


Рис. 1. Схема исследуемой ЗС: а – часть полноразмерной ЗС с элементами согласования, б – схема ЗС с размерами.

метрии дисперсионная характеристика представляет собой две ветви, пересекающиеся на π -виде колебаний (рис. 2а). При напряжении пучка 14 кВ возможен синхронизм с замедленной электромагнитной волной как на прямой гармонике на ча-

стоте около 96 ГГц, так и на обратной гармонике в окрестности частоты 85 ГГц. На рис. 2б представлена зависимость усредненного по поперечному сечению сопротивления связи для прямой и обратной пространственных гармоник. В диапазоне

Таблица 1. Геометрические параметры ЗС W-диапазона

Геометрический параметр	Значение, мкм	Измеренное значение, мкм
Размеры волновода, $a \times b$	2200 × 960	—
Период, d	550	529.62 ± 9.14
Ширина меандра, l	1450	1431.76 ± 5.10
Ширина полоска, w_x	150	147.40 ± 2.31
Ширина полоска, w_z	225	216.28 ± 2.42
Ширина опоры, w_p	200	185.60 ± 6.26
Длина опоры, l_p	180	179.27 ± 5.17
Толщина полоска, t_{me}	200	—

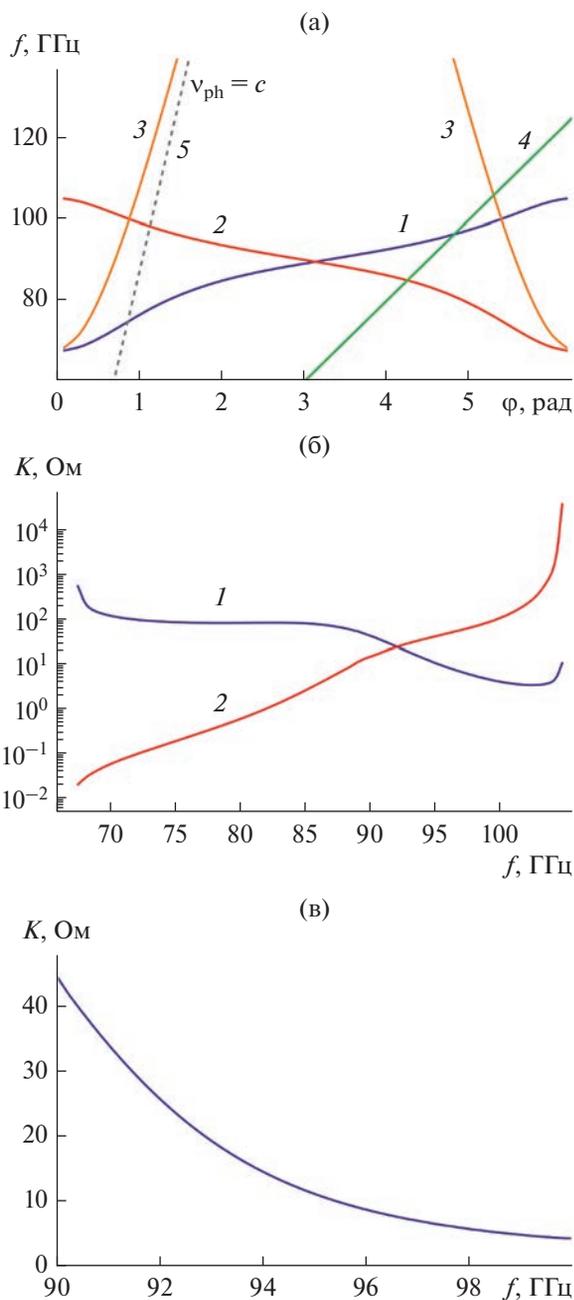


Рис. 2. Электродинамические параметры ЗС: а – дисперсионные характеристики прямой (1) и обратной (2) гармоник, а также незамедленной объемной моды (3), линия пучка при напряжении 14 кВ (4), линия скорости света (5); б – зависимости усредненного сопротивления связи прямой (1) и обратной (2) гармоник от частоты; в – увеличенный фрагмент зависимости сопротивления связи прямой гармоники в рабочем диапазоне.

90...100 ГГц сопротивление связи прямой гармоники принимает высокие значения, 5...40 Ом (рис. 2в). При этом сопротивление связи обратной гармоники вблизи частоты синхронизма 85 ГГц составляет около 1.5 Ом.

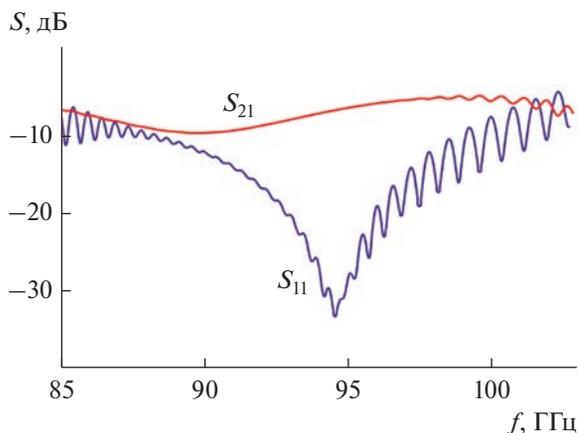


Рис. 3. Зависимость S-параметров от частоты для структуры из 30 периодов с согласующими устройствами на концах.

Была построена полноразмерная модель системы, состоящей из 30 периодов меандра, помещенных в прямоугольный волновод с согласующим устройством ввода/вывода (см. рис. 1а). Расчет S-параметров такой структуры был проведен с использованием программного пакета CST Studio Suite. Для учета поверхностной шероховатости структуры эффективная проводимость металла была принята равной $\sigma = 3.0 \times 10^7$ См/м. Результаты представлены на рис. 3. В рабочем диапазоне коэффициент отражения менее -15 дБ, а потери на прохождение составляют 0.2...0.27 дБ/период.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Моделирование электронно-волнового взаимодействия также проводили с помощью пакета CST Studio Suite. Предполагалось, что взаимодействие происходит с двулучевым ленточным электронным потоком с общим током пучков 200 мА, а напряжение пучка составляет 14 кВ. Фокусировка электронного потока осуществлялась однородным продольным магнитным полем 1 Тл. Чтобы получить значения коэффициента усиления свыше 30 дБ, избежав при этом паразитного самовозбуждения на обратной гармонике, была разработана модель ЛБВ, состоящая из двух секций длиной по 30 периодов, с разрывом. Сначала было проведено моделирование линейного режима усиления при входной мощности ~10 мВт. Зависимость коэффициента усиления от частоты представлена на рис. 4. Максимальный коэффициент усиления достигает 37 дБ, полоса усиления по уровню -3 дБ составляет более одного гигагерца.

Затем были исследованы характеристики ЛБВ в нелинейном режиме работы. Согласно расчетам на частоте 97.5 ГГц достигается максимальная выходная мощность в 121 Вт при входной мощно-

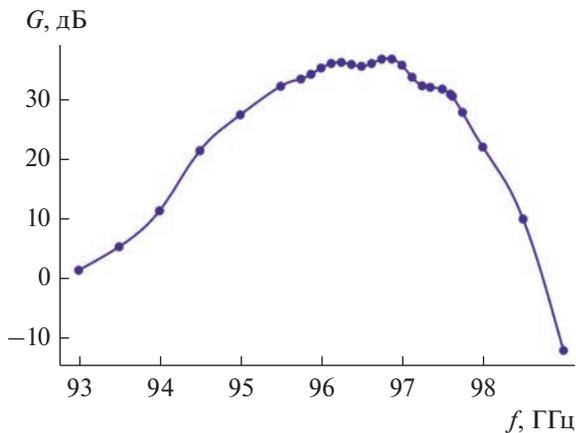


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления от частоты для ЛБВ, состоящей из двух секций из 30 периодов каждая, при токе пучка 200 мА и напряжении 14 кВ.

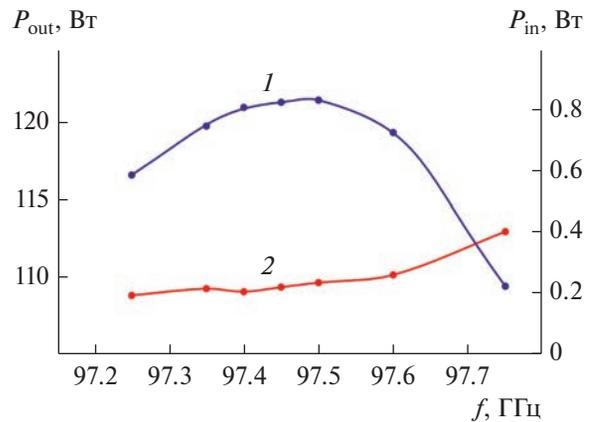


Рис. 5. Зависимость мощности насыщения (1) и соответствующей входной мощности (2) от частоты при токе пучка 200 мА и напряжении 14 кВ.

сти 0.23 Вт. На рис. 5 представлены зависимости мощности насыщения от частоты, а также соответствующей входной мощности.

3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Тестовые образцы ЗС изготавливали с помощью прецизионной лазерной резки импульсами наносекундной длительности [7]–[9]. Образцы ЗС формировались из тонкого листа бескислородной меди толщиной 200 мкм. Прецизионная резка производили с использованием лазерной технологической установки МиниМаркер 2-20А4 (ООО “Лазерный центр”, Россия). Совместно с лазерной установкой была использована система прецизионного перемещения столика с образцом, построенная на базе микроподвижек 8MT175-50XYZ (Standa Ltd.). Дистанция перемещения указанной системы по каждой из осей составляет 50 мм, стандартный шаг перемещения 2.5 мкм, прецизионный шаг перемещения ~0.3 мкм.

Опишем технологический маршрут создания ЗС. Вначале с помощью редактора векторной графики создается макет траекторий движения лазерного луча. Специализированное программное обеспечение лазерной технологической установки преобразует данный макет в набор команд, управляющих положением лазерного пучка.

Далее производится лазерная микрообработка. Данный этап можно подразделить на следующие шаги.

1. Лазерное излучение проходит по внутреннему контуру структуры, при этом используется наименьшая длительность лазерного импульса и наименьшая частота следования импульсов. Создается предварительный канал в виде аккуратного углубления на поверхности медного листа с

целью улучшения качества дальнейшей лазерной резки.

2. Лазерное излучение с большей мощностью в импульсе многократно проходит по ранее сформированному каналу и прорезает металл по контуру внутри структуры.

3. Сформированная структура ЗС вырезается из тонкого листа меди.

Затем производится ультразвуковая химическая чистка полученных структур с помощью ультразвуковой ванны и химических реагентов, таких как ортофосфорная кислота и спирт. Удаляются окислы металла и продукты процесса лазерной абляции по краям зона реза.

На заключительном этапе осуществляется детальный морфологический анализ полученных структур с помощью оптической (микроскоп Olympus MX51) и сканирующей электронной (MIRA II LMU, Tescan) микроскопии. Производится сопоставление размеров изготовленных структур ЗС с численной моделью.

В ходе проведенных работ были установлены следующие оптимальные требования к параметрам прецизионной лазерной резки:

- на первом шаге длительность импульса следует выбирать не более 4 нс, при этом частота следования импульсов не должна превышать 10 кГц, а скорость перемещения лазерного луча не должна превышать 10 мм/с;
- на втором шаге длительность импульса следует выбирать в диапазоне от 8 до 20 нс, при этом частота следования импульсов не должна превышать 20 кГц, а скорость перемещения лазерного луча не должна превышать 20 мм/с;
- на третьем шаге длительность импульса следует выбирать в диапазоне от 20 до 50 нс, при этом частота следования импульсов может доходить до

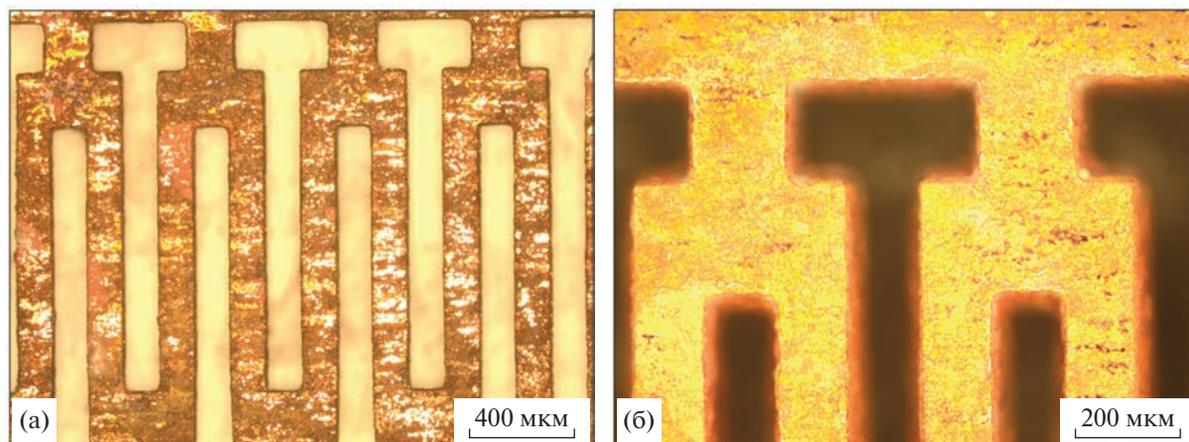


Рис. 6. Изображение структуры, полученное на оптическом микроскопе. а – общий вид, б – увеличенный фрагмент.

100 кГц, а скорость перемещения лазерного луча до 100 мм/с.

С помощью описанного технологического подхода были изготовлены тестовые образцы ЗС. Фотография образца изготовленной структуры ЗС, а также увеличенные фрагменты ее элементов приведены на рис. 6, а СЭМ-изображение – на рис. 7. Была рассчитана погрешность изготовления основных элементов указанной структуры ЗС. Для этого в пяти точках осуществлялся замер латеральных размеров, после чего осуществлялся расчет доверительного интервала. Полученные результаты измерений приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что погрешность в изготовлении не превышает 9 мкм.

Предполагается, что для формирования полноценной ЗС с согласующими устройствами будет сформирован наборный пакет тонких медных пластин с вырезанными отверстиями заданной

формы. Одна из пластин будет представлять собой меандровую линию, а остальные – формировать прямоугольный волновод и согласующие устройства. Пайка пакета пластин будет также осуществляться с использованием лазерной установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты разработки полосковой ЗС типа меандр с металлическими опорами для миниатюрной мощной ЛБВ W-диапазона. Показано, что в такой системе возможен синхронизм на частотах вблизи 100 ГГц при напряжении порядка 14 кВ. При этом на данных частотах возможны высокие значения сопротивления связи (до 40 Ом). Разработана система согласования полосковой линии с ЗС, которая обеспечивает коэффициент отражения менее –15 дБ в области синхронизма. При этом омические потери в структуре в рабочем диапазоне составляют 0.2...0.27 дБ/период.

Разработана двухсекционная модель ЛБВ и проведен расчет выходных характеристик на основе трехмерного моделирования электронно-волнового взаимодействия. Получено, что при токе и напряжении пучка 200 мА и 14 кВ соответственно коэффициент усиления в линейном режиме достигает 37 дБ, а выходная мощность превышает 120 Вт на частоте 97.5 ГГц.

Апробирована технология изготовления полосковой замедляющей системы типа меандр с металлическими опорами с использованием лазерной резки тонких медных пластин с последующей химической и ультразвуковой обработкой. В ходе работы были установлены оптимальные параметры лазерной резки. Изготовленные образцы были исследованы методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Получено хорошее соответствие размеров изготовленных

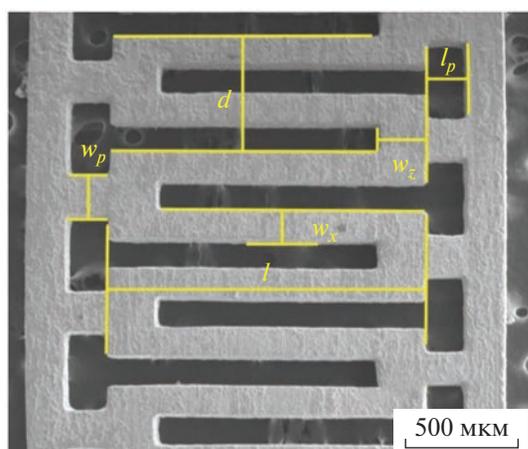


Рис. 7. СЭМ-изображение структуры: d – период, l_p – длина опоры, w_z – ширина полоска, w_p – ширина опоры, w_x – ширина полоска, l – ширина меандра.

образцов и компьютерной модели: погрешность в изготовлении не превышает 9 мкм.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00181).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Paoloni C., Gamzina D., Letizia R. et al.* // J. Electromag. Waves Appl. 2021. V. 35. № 5. P. 567.
<https://doi.org/10.1080/09205071.2020.1848643>
2. *Shao W., Xu D., Wang Zh. et al.* // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. № 6. P. 063106.
<https://doi.org/10.1063/1.5096331>
3. *Lu Z., Ding K., Wen R. et al.* // IEEE Electron Dev. Lett. 2020. V. 41. № 2. P. 284.
<https://doi.org/10.1109/LED.2019.2963686>
4. *Dong Y., Chen Z., Li X. et al.* // J. Electromag. Waves Appl. 2020. V. 34. № 16. P. 2236.
<https://doi.org/10.1080/09205071.2020.1807413>
5. *Wang H., Wang Zh., Li X. et al.* // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. № 6. P. 063113.
<https://doi.org/10.1063/1.5023776>
6. *Torgashov R.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M.* // IEEE Trans. 2022. V. ED-69. № 3. P. 1396.
<https://doi.org/10.1109/TED.2022.3141337>
7. *Ryskin N.M., Torgashov R.A., Starodubov A.V. et al.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2021. V. 39. № 1. P. 013204.
<https://doi.org/10.1116/6.0000716>
8. *Стародубов А.В., Ножкин Д.А., Расулов И.И. и др.* // РЭ. 2022. Т. 67. № 10. С. 935.
<https://doi.org/10.31857/S0033849422100126>
9. *Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Galkin A.G. et al.* // Intern. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov, 24–25 Sept. 2020. N.Y.: IEEE, 2020. P. 256.
<https://doi.org/10.1109/APEDE48864.2020.9255610>