

13.4

Использование модифицированных брэгговских рефлекторов для стабилизации и перестройки частоты в планарных генераторах поверхностной волны

© Н.Ю. Песков^{1–3}, В.Ю. Заславский^{1–3}, К.А. Лещева^{1–3}¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

E-mail: peskov@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 22 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 1 апреля 2024 г.

Принято к публикации 2 мая 2024 г.

Для достижения высокой когерентности излучения в сверхразмерных черенковских генераторах поверхностной волны предложено использовать дополнительный резонансный брэгговский рефлектор модифицированного типа, основанный на связи бегущих и квазикритических волн. В рамках проведенного трехмерного моделирования показано, что рефлекторы данного типа позволяют обеспечить в генераторах поверхностной волны планарной геометрии устойчивый узкополосный режим генерации с возбуждением основной моды замедляющей структуры при сверхразмерности (ширине), составляющей около 7–10 длин волн излучения. Дополнительным преимуществом предложенной планарной схемы генераторов является возможность плавной механической перестройки частоты при изменении величины зазора резонансного рефлектора. Проведена оценка параметров для реализации мощного генератора поверхностной волны W-диапазона на базе сильноточного ускорительного комплекса „ЭЛМИ“ (ИЯФ СО РАН).

Ключевые слова: релятивистские черенковские генераторы, мощное микроволновое излучение, брэгговские резонаторы, селекция мод.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.16.58534.19902

С момента первых успешных реализаций [1,2] и по настоящее время [3–8] большое внимание уделяется созданию релятивистских генераторов поверхностной волны (ГПВ), основанных на черенковском механизме взаимодействия. В этих приборах используется резонансное взаимодействие прямолинейного релятивистского электронного пучка (РЭП) с медленной основной гармоникой высокочастотного (ВЧ) поля в периодически гофрированном волноводе — замедляющей системе (так называемый режим π -вида), что обеспечивает высокий импеданс электронно-волновой связи. Это открывает возможность увеличения сверхразмерности данных генераторов и в итоге выходной мощности по сравнению с аналогичными характеристиками других типов черенковских приборов (ламп обратной и бегущей волны), реализованные поперечные размеры которых не превосходят 2–3 длины волны излучения λ . Таким образом, рекордный мультигигаваттный уровень мощности излучения достигнут в так называемых многоволновых черенковских генераторах (разновидности ГПВ, также использующей взаимодействие вблизи π -вида) в диапазонах частот от X до Ка при сверхразмерности (диаметре) пространства взаимодействия $D/\lambda \geq 5$ [3,4].

Поверхностную волну можно рассматривать как „супермоду“, которая представляет собой набор нескольких волноводных мод с коррелированными фазами, прижатый к поверхности замедляющей системы.

Это решает проблему пространственной когерентности излучения в направлении нормали к поверхности (радиальном в случае цилиндрической геометрии) при произвольных поперечных размерах системы. Однако в условиях значительной сверхразмерности возникает проблема синхронизации излучения по „широкой“ поперечной (азимутальной) координате. Моделирование показывает (см. подробнее [9]), что даже при поперечных размерах $D/\lambda \sim 5$ „канонические“ схемы ГПВ, основанные на одномерно-периодических (1D) замедляющих системах, в отличие от ГПВ, использующих двумерно-периодические (2D) структуры [10], теряют когерентность излучения по поперечным (азимутальным) индексам мод.

Для обеспечения когерентности излучения в ГПВ на основе 1D замедляющих структур в настоящей работе предлагается использовать дополнительный резонансный брэгговский рефлектор модифицированного типа [11,12], расположенный на входе генератора. Целью работы является исследование возможности селективного возбуждения основной моды в указанной схеме ГПВ в условиях существенной сверхразмерности.

Исследованная схема ГПВ планарной геометрии показана на рис. 1. Основу его электродинамической системы составляет 1D замедляющая структура с гофрировкой вида

$$a = a_{1D} \cos(h_{1D}z) \quad (1)$$

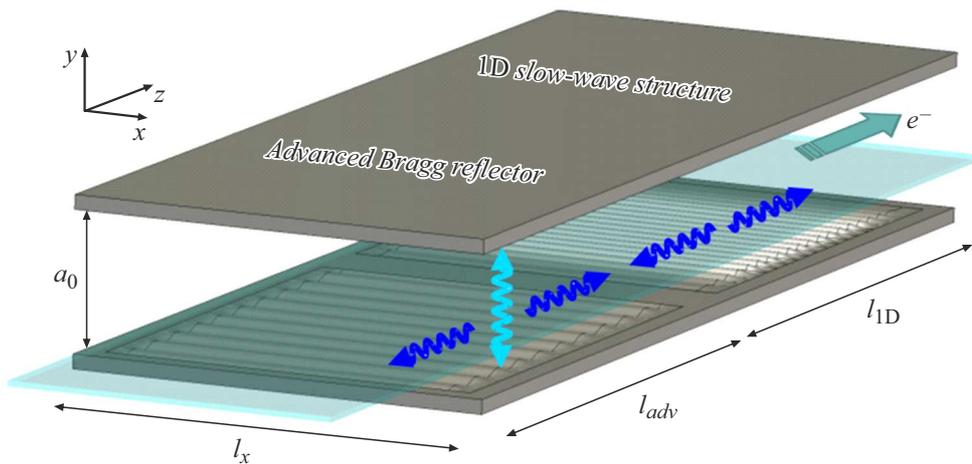


Рис. 1. Схема планарного черенковского генератора поверхностной волны с одномерно-периодической замедляющей системой и входным резонансным брэгговским рефлектором модифицированного типа. Показано направление движения ленточного электронного пучка, запитывающего генератор. Стрелки иллюстрируют направления распространения парциальных волновых потоков в различных секциях его электродинамической системы.

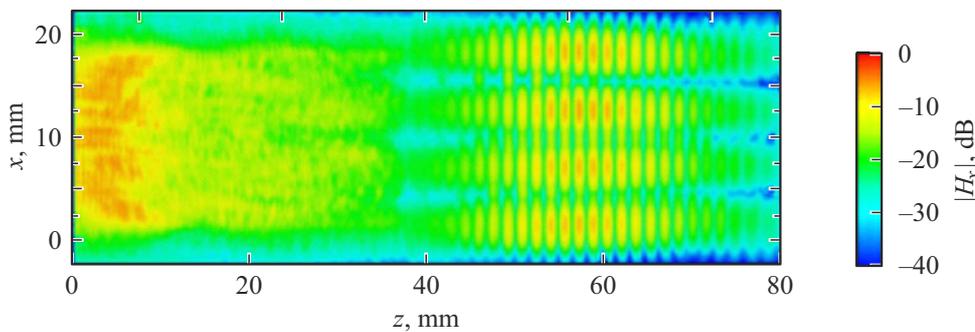


Рис. 2. Результаты трехмерного моделирования генератора поверхностной волны W-диапазона с входным широкополосным (нерезонансным) рефлектором на базе ускорителя „ЭЛМИИ“ (код CST Studio Suite): генерация на высокой моде в определенный промежуток времени (параметр сверхразмерности $l_x/\lambda \sim 7$).

($h_{1D} = 2\pi/d_{1D}$, d_{1D} — период гофрировки, a_{1D} — ее амплитуда). В рамках развитого в [9] квазиоптического подхода излучаемое поле может быть представлено в виде двух встречно распространяющихся квазиоптических волновых потоков

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_A \text{Re}[(A_+ e^{-ihz} + A_- e^{ihz}) e^{i\omega t}] \quad (2)$$

(A_{\pm} — медленные амплитуды, \mathbf{E}_A — структурный фактор, характеризующий поляризацию волн), связанных на данной гофрировке в условиях брэгговского резонанса

$$h_{1D} \approx 2h \quad (3)$$

и формирующих рабочую поверхностную волну.

На входе генератора установлена модифицированная брэгговская структура [11] (рис. 1), представляющая собой секцию планарного волновода с неглубокой гофрировкой

$$a = a_{adv} \cos(h_{adv} z) \quad (4)$$

($h_{adv} = 2\pi/d_{adv}$, d_{adv} и a_{adv} — период и амплитуда гофрировки). В условиях резонанса

$$h \approx h_{adv} \quad (5)$$

эта гофрировка обеспечивает связь и взаимное рассеяние двух парциальных волновых потоков вида (2) и квазикритической волны

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_B \text{Re}[B e^{i\omega t}]. \quad (6)$$

Важно подчеркнуть, что в отличие от „традиционных“ брэгговских аналогов, основанных на связи двух встречно распространяющихся парааксиальных волн [13–15], в модифицированной брэгговской структуре прямое взаимное рассеяние попутного A_+ и встречного A_- волновых пучков отсутствует и возникает только через возбуждение квазикритического волнового пучка B . Вовлечение квазикритической волны в цепь обратной связи, подобно гиротронам, позволяет значительно разредить спектр собственных мод брэгговских структур

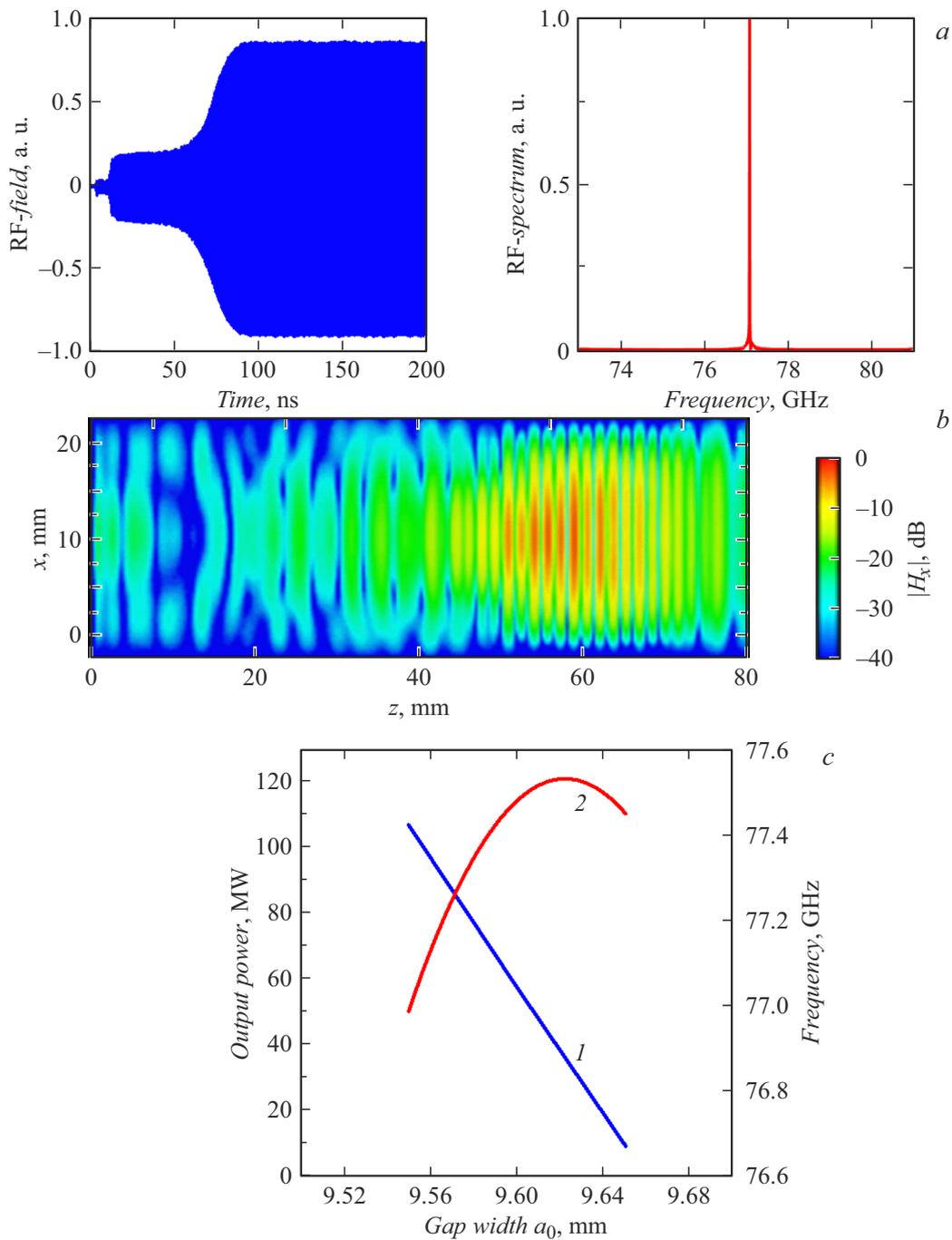


Рис. 3. Результаты моделирования генератора поверхностной волны W-диапазона с резонансным брэгговским отражателем модифицированного типа на базе ускорителя „ЭЛМИИ“ (код CST Studio Suite): установление стационарного режима генерации на нижней моде замедляющей системы. *a* — зависимость от времени компоненты магнитного поля H_x на выходе генератора (слева) и спектр излучения (справа); *b* — структура ВЧ-поля в стационарном режиме; *c* — перестройка частоты генерации (кривая 1) и изменение выходной мощности (кривая 2) при варьировании величины зазора планарной системы a_0 (параметр сверхразмерности $l_x/\lambda \sim 7$).

данного типа в условиях существенной сверхразмерности и увеличить их селективность по сравнению с „традиционными“ аналогами. Работоспособность и высокие селективные характеристики модифицированных брэгговских структур в настоящее время продемонстри-

рованы в области частот вплоть до 0.7 THz при факторе сверхразмерности $D/\lambda \sim 45$ [16].

В предлагаемой схеме модифицированная структура выполняет роль эффективного узкополосного рефлектора, для которого можно обеспечить ширину полосы

брэгговского отражения меньше частотного интервала между модами замедляющей структуры. В этом случае в ГПВ может быть обеспечена одномодовая генерация на моде, имеющей определенный поперечный индекс по „широкой“ координате x (в планарной системе) или азимутальный индекс (в цилиндрической системе), частота которой лежит в полосе отражения резонансного рефлектора.

Следует отметить, что предлагаемый механизм селекции мод является развитием подхода, описанного в [17,18]. Однако несомненным преимуществом модифицированных брэгговских структур по сравнению с резонансными отражателями в виде дроссельной канавки, рассмотренными ранее, является возможность работы при значительно больших поперечных размерах генераторов.

Возможность использования модифицированных брэгговских рефлекторов в ГПВ планарной геометрии была исследована в рамках численного моделирования на базе трехмерного программного комплекса CST Studio Suite. Параметры моделирования выбирались близкими к условиям экспериментов, проводимых в сотрудничестве ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Нижний Новгород) на ускорительном комплексе „ЭЛМИ“ [19]. Для работы в W -диапазоне (рабочая частота ~ 77 GHz) была спроектирована замедляющая структура с поперечным сечением 10×28 mm (т.е. $\sim 2.5\lambda \times 7\lambda$) и длиной $l_{1D} \approx 35$ mm, период и амплитуда 1D-гофрировки, выполненной на одной из пластин планарного волновода, составляли $d_{1D} \approx 1.55$ mm и $a_{1D} \approx 0.3$ mm соответственно. Разработанный модифицированный брэгговский рефлектор имел гофрировку с периодом $d_{adv} \approx 4$ mm и амплитудой $a_{adv} \approx 0.2$ mm, которая формировала цикл обратной связи, содержащий два встречно распространяющихся волновых пучка низшего ТЕМ-типа и квазикритический волновой пучок ТМ₅-типа; длина структуры составляла $l_{adv} \approx 40$ mm. Для запитки генератора предполагается использовать ленточный РЭП 700 keV/1 kA/3 μ s с поперечным сечением 0.5×20 mm, фокусируемый ведущим магнитным полем ~ 1.5 Т. Формирование пространственно-развитых РЭП ленточной конфигурации с параметрами, приемлемыми для эффективной работы релятивистских генераторов W -диапазона, продемонстрировано в серии предварительных электронно-оптических экспериментов, проведенных на ускорительном комплексе „ЭЛМИ“ (см. подробнее [19]).

В рамках моделирования проводилось сравнение двух схем ГПВ с идентичными параметрами: в первой схеме на входе системы использовалось широкополосное зеркало, во второй — узкополосный резонансный отражатель с указанными выше параметрами.

Моделирование показывает, что в отсутствие резонансного рефлектора имеет место мультистабильная генерация, характеризующаяся возбуждением большого числа мод с различными поперечными индексами и случайными фазами. На рис. 2 показана реализация, когда

в течение определенного периода времени происходит генерация на моде, имеющей четыре вариации ВЧ-поля вдоль „широкой“ поперечной координаты x .

Использование узкополосного модифицированного брэгговского рефлектора, согласно результатам моделирования, приводит к установлению стабильного режима генерации на низшей моде, имеющей одну вариацию поля по продольной z и поперечной x координатам (рис. 3, *a, b*). В данной схеме при оптимальных параметрах электронный КПД достигает 15%, что соответствует выходной мощности до 120 MW.

Дополнительным преимуществом предлагаемой схемы генератора является возможность плавной перестройки частоты излучения при изменении величины зазора a_0 планарной системы (что приводит к изменению частоты отсечки волны обратной связи B в модифицированной брэгговской структуре). Моделирование показывает (рис. 3, *c*), что в разработанном проекте планарного ГПВ можно реализовать перестройку частоты генерации в диапазоне $\sim 1\%$, которая, однако, сопровождается заметным изменением эффективности электронно-волнового взаимодействия (в данном моделировании изменение величины зазора выполнялось при неизменных параметрах РЭП).

Таким образом, проведенный теоретический анализ и трехмерное моделирование продемонстрировали работоспособность и хорошие перспективы использования нового типа резонансного брэгговского рефлектора для обеспечения стабильного режима узкополосной генерации на расчетной рабочей моде в ГПВ на основе одномерно-периодических замедляющих систем, обладающих существенной сверхразмерностью. Развитие системы в поперечном направлении открывает возможность увеличения интегральной мощности генератора при сохранении плотностей тока и волновых потоков на умеренном уровне. Экспериментальная реализация разработанного планарного генератора W -диапазона инициирована в настоящее время на базе ускорителя „ЭЛМИ“.

Финансирование работы

Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ (грант № 23-19-00370).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.Ф. Александров, С.Ю. Галузо, В.И. Канавец, В.А. Плетюшкин, ЖТФ, **51** (8), 1727 (1981).
- [2] С.П. Бугаев, В.И. Канавец, А.И. Климов, В.И. Кошелев, В.А. Черепенин, Письма в ЖТФ, **9** (22), 1385 (1983).
- [3] S.P. Bugaev, V.A. Cherepenin, V.I. Kanavets, A.I. Klimov, A.D. Kopenkin, V.I. Koshelev, V.A. Popov, A.I. Slepko, IEEE Trans. Plasma Sci., **18** (3), 525 (1990). DOI: 10.1109/27.55924

- [4] A.N. Vlasov, A.G. Shkvarunets, J.C. Rodgers, Y. Carmel, T.M. Antonsen, T.M. Abuefadi, D. Lingze, V.A. Cherepenin, G.S. Nusinovich, M. Botton, V.L. Granatstein, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **28** (3), 550 (2000). DOI: 10.1109/27.887671
- [5] В.А. Черепенин, *УФН*, **176** (10), 1124 (2006). DOI: 10.3367/UFNr.0176.200610L1124 [V.A. Cherepenin, *Phys. Usp.*, **49** (10), 1097 (2006). DOI: 10.1070/PU2006v049n10ABEH006109].
- [6] J. Wang, G. Wang, D. Wang, S. Li, P. Zeng, *Sci. Rep.*, **8** (1), 6978 (2018). DOI: 10.1038/s41598-018-25466-w
- [7] M. Aoki, Y. Annaka, K. Ogura, M. Ito, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **60** (9), 096004 (2021). DOI: 10.35848/1347-4065/ac1de9
- [8] Y. Annaka, K. Ogura, M. Aoki, S. Hamada, T. Kato, M. Ito, *Plasma Fusion Res.*, **17**, 2406036 (2022). DOI: 10.1585/pfr.17.2406036
- [9] Н.С. Гинзбург, В.Ю. Заславский, А.М. Малкин, А.С. Сергеев, *ЖТФ*, **83** (2), 119 (2013). [N.S. Ginzburg, V.Yu. Zaslavsky, A.M. Malkin, A.S. Sergeev, *Tech. Phys.*, **58** (2), 267 (2013). DOI: 10.1134/S1063784213020102].
- [10] N.Yu. Peskov, V.Yu. Zaslavsky, A.N. Denisenko, E.B. Abubakirov, A.M. Malkin, M.D. Proyavin, A.S. Sergeev, N.S. Ginzburg, *IEEE Electr. Device Lett.*, **44** (10), 1756 (2023). DOI: 10.1109/LED.2023.3307201
- [11] A.V. Arzhannikov, N.S. Ginzburg, P.V. Kalinin, A.M. Malkin, N.Yu. Peskov, A.S. Sergeev, S.L. Sinitsky, M. Thumm, V.Yu. Zaslavsky, *Appl. Phys. Lett.*, **101** (8), 083507 (2012). DOI: 10.1063/1.4747149
- [12] N.Yu. Peskov, N.S. Ginzburg, I.I. Golubev, S.M. Golubykh, A.K. Kaminsky, A.P. Kozlov, A.M. Malkin, S.N. Sedykh, A.S. Sergeev, A.I. Sidorov, V.Yu. Zaslavsky, *Appl. Phys. Lett.*, **116** (21), 213505 (2020). DOI: 10.1063/5.0006047
- [13] Н.Ф. Ковалев, И.М. Орлова, М.И. Петелин, *Изв. вузов. Радиофизика*, **11** (5), 783 (1968). [N.F. Kovalev, I.M. Orlova, M.I. Petelin, *Radiophys. Quantum Electron.*, **11**, 449 (1968). DOI: 10.1007/BF01034380].
- [14] В.Л. Братман, Н.С. Гинзбург, Г.Г. Денисов, *Письма в ЖТФ*, **7** (21), 1320 (1981).
- [15] A. Yariv, *Quantum electronics* (John Wiley and Sons, Inc., N.Y., 1975).
- [16] Н.Ю. Песков, А.В. Аржанников, В.И. Белоусов, Н.С. Гинзбург, В.Ю. Заславский, Д.А. Никифоров, Ю.С. Опарина, А.В. Савилов, Е.С. Сандалов, С.Л. Синицкий, Д.И. Соболев, *Изв. РАН. Сер. физ.*, **87** (5), 755 (2023). DOI: 10.31857/S0367676522701290 [N.Yu. Peskov, A.V. Arzhannikov, V.I. Belousov, N.S. Ginzburg, V.Yu. Zaslavsky, D.A. Nikiforov, Yu.S. Oparina, A.V. Savilov, E.S. Sandalov, S.L. Sinitsky, D.I. Sobolev, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **87** (5), 669 (2023). DOI: 10.3103/S1062873822701842].
- [17] И.К. Куркан, В.В. Ростов, Е.М. Тотъменинов, *Письма в ЖТФ*, **24** (10), 43 (1998). [I.K. Kurkan, V.V. Rostov, E.M. Tot'meninov, *Tech. Phys. Lett.*, **24** (5), 388 (1998). DOI: 10.1134/1.1262101].
- [18] С.Д. Коровин, И.К. Куркан, В.В. Ростов, Е.М. Тотъменинов, *Изв. вузов. Радиофизика*, **42** (12), 1189 (1999). [S.D. Korovin, I.K. Kurkan, V.V. Rostov, E.M. Tot'meninov, *Radiophys. Quantum Electron.*, **42** (12), 1047 (1999). DOI: 10.1007/BF02677128].
- [19] A.V. Arzhannikov, N.S. Ginzburg, P.V. Kalinin, A.M. Malkin, I.V. Martyanov, N.Yu. Peskov, D.A. Samtsov, E.S. Sandalov, A.S. Sergeev, S.L. Sinitsky, V.D. Stepanov, A.A. Vikharev, V.Yu. Zaslavsky, *IEEE Trans. Electr. Devices*, **69** (5), 2662 (2022). DOI: 10.1109/TED.2022.3161899