

УДК 621.385.632

ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ СО СВОЙСТВАМИ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ W-ДИАПАЗОНА¹

© 2024 г. А. А. Ростунцова^{a, b, *}, Е. Е. Колесниченко^{a, b}, Н. М. Рыскин^{a, b}

^aСаратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019 Российская Федерация,

^bСаратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012 Российская Федерация

*E-mail: rostuncova@mail.ru

Поступила в редакцию 26.04.2024 г.

После доработки 22.05.2024 г.

Принята к публикации 25.05.2024 г.

Исследованы электродинамические характеристики лестничных замедляющих систем (ЗС), которые образованы металлической пластиной с периодически расположенными щелями определенной формы, помещенной в волновод. Предложены модификации лестничной ЗС, связанные с усложнением формы щелей в пластине или формы волновода таким образом, чтобы частота щелевого резонанса была ниже частоты отсечки волновода, при этом ЗС проявляет свойства дважды отрицательного метаматериала. Показано, что основная пространственная гармоника является обратной, в то время как на +1-й гармонике имеет место нормальная дисперсия и обеспечивается синхронизм пучка с волной в достаточно широкой полосе частот. Разработаны конструкции ЗС с гантелеобразными щелями и ЗС в волноводе с продольными пазами для лампы бегущей волны W-диапазона (75...110 ГГц) с относительной шириной полосы частот порядка 25% и рабочими напряжениями 8...13 кВ, в которых имеется возможность взаимодействия замедленной волны с двумя ленточными электронными пучками, распространяющимися сверху и снизу пластины.

Ключевые слова: замедляющая система, метаматериал, лампа бегущей волны, миллиметровый диапазон

DOI: 10.31857/S0033849424100077, **EDN:** HPYSIG

ВВЕДЕНИЕ

Субтерагерцевый (субТГц) диапазон частот имеет широкие перспективы применения, прежде всего для нового поколения высокоскоростных систем беспроводной передачи данных [1]. Актуальным является создание миниатюрных электровакуумных приборов субТГц-диапазона, прежде всего широкополосных усилителей на основе лампы бегущей волны (ЛБВ) [2]. Для получения приемлемых значений выходной мощности целесообразно использовать пространственно-развитые замедляющие системы (ЗС), в которых

осуществляется взаимодействие с многолучевыми электронными пучками. В частности, вызывают интерес лестничные ЗС, которые представляют собой систему параллельных металлических пластин с периодически вырезанными в них щелями определенной формы [3,4]. Между пластинами может распространяться несколько электронных пучков. Однако простейший вариант лестничной ЗС с прямоугольными щелями обладает сильной дисперсией на основной гармонике, поэтому его проблематично использовать для создания широкополосных ЛБВ-усилителей.

В данной работе исследованы модификации лестничной ЗС, связанные с усложнением формы щелей в пластине или формы волновода таким

¹ Работа удостоена премии на 20-м Конкурсе молодых ученых имени Ивана Анисимкина.

образом, чтобы частота щелевого резонанса была ниже частоты отсечки волновода. Особенностью подобных ЗС является проявление свойств дважды отрицательного метаматериала (эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости отрицательны) [5–10]. В таких структурах основная пространственная гармоника является обратной, в то время как на +1-й гармонике имеет место нормальная дисперсия и обеспечивается синхронизм пучка с волной в достаточно широкой полосе частот при умеренных напряжениях электронного пучка.

1. ЛЕСТНИЧНАЯ ЗАМЕДЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ЩЕЛЯМИ

Схема простейшей лестничной ЗС показана на рис. 1. Она представляет собой вставленную в прямоугольный волновод с поперечным сечением $H_x \times H_y$ металлическую пластину толщиной t , в которой с периодом p вырезаны прямоугольные щели размером $L \times l$.

На рис. 2 представлена дисперсионная диаграмма основной моды ЗС, рассчитанная в пакете численного моделирования COMSOL Multiphysics.

Нижняя частота отсечки соответствует критической частоте прямоугольного волновода и определяется его шириной H_x :

$$f_{кр} = c/(2H_x), \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме. Верхняя частота отсечки соответствует частоте щелевого резонанса, которая определяется длиной щели L :

$$f_0 = c/(2L). \quad (2)$$

При выбранных размерах (табл. 1) рабочие частоты лежат в W-диапазоне, $f_{кр} \approx 50$ ГГц, $f_0 \approx 103$ ГГц. Область нормальной дисперсии соответствует сдвигам фазы на период структуры $0 < \varphi < \pi$, т.е. основная гармоника является прямой. На рис. 2 также изображена линия пучка при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Существенным недостатком данной ЗС является сильная дисперсия основной гармоники. Приемлемое замедление волны, обеспечивающее синхронизм при нерелятивистских напряжениях, наблюдается в узком частотном диапазоне вблизи верхней отсечки. Такая структура является недостаточно широкополосной для создания ЛБВ-усилителей. Однако она может быть использована для разработки низковольтных генераторов на основе лампы обратной волны (ЛОВ), когда синхронизм реализуется на –1-й гармонике. Подобные приборы были реализованы еще в 1950 годах [11].

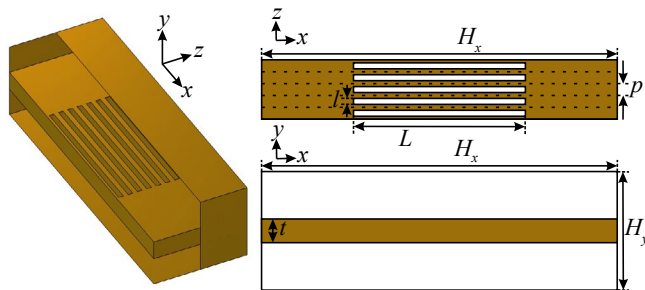


Рис. 1. Схема простейшей лестничной ЗС с прямоугольными щелями: $H_x \times H_y$ — размеры волновода, t — толщина пластины, p — период, $L \times l$ — размеры щели.

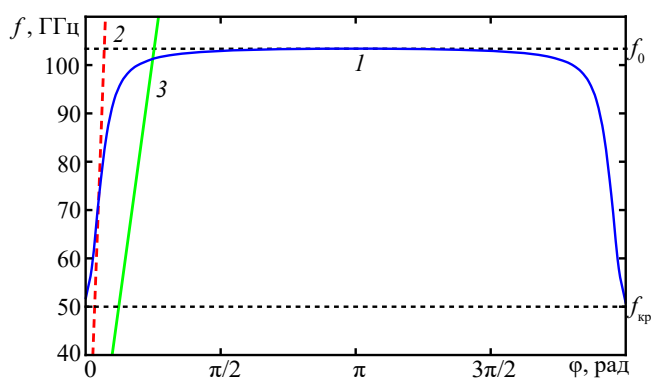


Рис. 2. Дисперсионная характеристика основной моды ЗС с прямоугольными щелями W-диапазона (1), линия скорости света (2) и линия пучка при напряжении 20 кВ (3).

Таблица 1. Геометрические параметры ЗС с прямоугольными щелями W-диапазона

Геометрический параметр	Значение, мм
$H_x \times H_y$	3.00×1.80
t	0.20
p	0.10
$L \times l$	1.45×0.05

В настоящее время такие ЗС используются в узкополосных усилителях типа клистронов с распределенным взаимодействием [12].

2. ЛЕСТНИЧНАЯ ЗС С ЩЕЛЯМИ В ФОРМЕ РАЗОМКНУТЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КОЛЕЦ

Если модифицировать геометрию лестничной ЗС таким образом, чтобы частота щелевого резонанса была ниже частоты отсечки волновода, $f_0 < f_{кр}$, то вид дисперсионной характеристики качественно изменится: основная гармоника ста-

нет обратной, а нормальная дисперсия будет иметь место для +1-й пространственной гармоники. Простейший способ достичь условия $f_0 < f_{кр}$ состоит в увеличении длины щели так, чтобы она стала больше ширины волновода, $L > H_x$ (см. формулы,). Это возможно, если придать щели более сложную форму, например, в виде разомкнутого прямоугольного кольца. Пример трансформации прямоугольной щели в разомкнутое кольцо при увеличении L показан на рис. 3. Суммарная длина щели определяется параметрами кольца: $L = w + 2s + 2q$.

На рис. 4 представлены результаты численного моделирования дисперсионных характеристик ЗС при постепенном увеличении L , как показано на рис. 3. Расчеты проводились в пакете COMSOL. Размеры, соответствующие кривым 1–6, указаны в табл. 2.

Частота отсечки волновода $f_{кр} \approx 150$ ГГц. Кривая 1 соответствует случаю прямоугольной щели, $L < H_x$. После трансформации в кольцо, когда суммарная длина становится равной ширине волновода, $L \approx H_x$, дисперсионная характеристика практически вырождается в прямую (кривая 2). При $L > H_x$, когда $f_0 < f_{кр}$, характер дисперсии меняется (кривые 3–6): основная пространственная гармоника ($0 < \varphi < \pi$) становится обратной, а +1-я гармоника ($\pi < \varphi < 2\pi$) — прямой. Таким образом, появляется возможность реализовать усиление на +1-й гармонике при достаточно низких рабочих напряжениях (5...15 кВ). Полоса пропускания ЗС с ростом L смещается в область более низких частот, а ширина полосы меняется слабо и составляет примерно 10...15 ГГц.

Замедляющие системы с щелями в форме разомкнутых прямоугольных колец исследовались ранее в ряде работ (см., например, [5–7]) для создания ЛОВ-генератора с релятивистским электронным пучком. Щели рассматривались как кольцевые резонаторы (так называемые, complementary splitting resonators (CSSR)), которые часто выступают

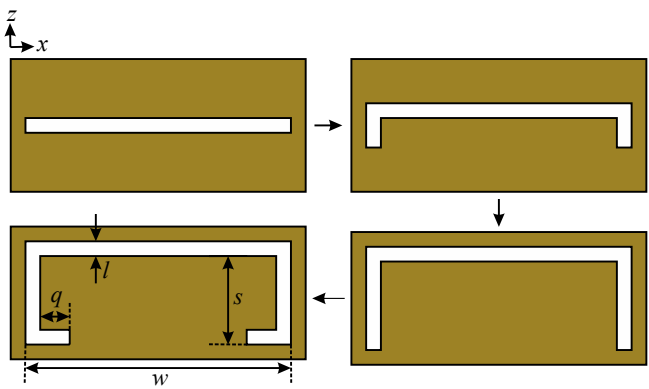


Рис. 3. Пример деформации прямоугольной щели в разомкнутое кольцо при увеличении длины щели L . Суммарная длина щели определяется как $L = w + 2s + 2q$ (w, s, q — характерные размеры прямоугольного кольца, l — толщина щели).

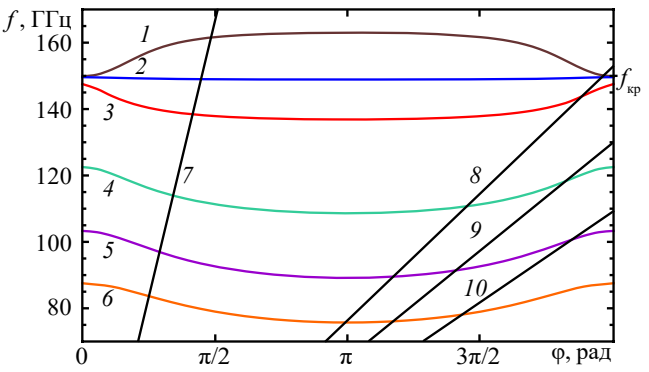


Рис. 4. Дисперсионные характеристики основной моды ЗС с щелями в форме разомкнутых прямоугольных колец при различной длине щели L : 1 — вырожденный случай, когда щель прямоугольная, $H_x > L = 0.9$; кривая 2 — $H_x \approx L = 1.0$; 3 — $H_x < L = 1.1$; 4 — $H_x < L = 1.4$; 5 — $H_x < L = 1.7$; 6 — $H_x < L = 2.0$ (подробнее см. табл. 2); 7 — линия скорости света; 8, 9 и 10 — линии пучка при напряжениях 14, 10 и 7 кВ соответственно.

Таблица 2. Геометрические параметры ЗС с щелями в форме разомкнутого прямоугольного кольца

Геометрический параметр	Значение, мм					
	1	2	3	4	5	6
$H_x \times H_y$	1.00×1.00					
t	0.20					
p	0.45					
l	0.05					
w	0.90					
s	—	0.05	0.10	0.25	0.30	0.30
q	—	—	—	—	0.10	0.25
L	0.90	1.00	1.10	1.40	1.70	2.00

Примечание: w, s, q — размеры кольца (см. рис. 3).

в качестве строительных блоков при создании метаматериалов [13]. Метаматериалы представляют собой среды, которые обладают необычными электродинамическими свойствами, обусловленными искусственно созданной периодической структурой из резонансных элементов определенной формы [9, 13]. Аналогия между метаматериалами и периодическими электродинамическими структурами, используемыми в приборах вакуумной СВЧ-электроники, не раз отмечалась в литературе (см., например, [9, 14]). Так, CSSR-структуры, разработанные в [5–7], проявляют свойства левой среды, эффективная диэлектрическая и магнитная проницаемость которой отрицательны.

3. ЛЕСТНИЧНАЯ ЗС С ЩЕЛЯМИ ГАНТЕЛЕОБРАЗНОЙ ФОРМЫ

С точки зрения расширения возможностей управления дисперсией интерес представляет разработка лестничных ЗС с щелями более сложной формы, резонансная частота f_0 которых определяется несколькими геометрическими параметрами. В рамках этого подхода в данной работе предлагается ЗС с щелями гантелеобразной формы (рис. 5). Данную систему можно рассматривать как модификацию ЗС с I -образными щелями, которая была предложена в работе [10] для разработки широкополосной ЛБВ на 220 ГГц.

Гантелеобразная щель представляет собой резонатор, электрическое поле которого сосредоточено в узком зазоре размером $w \times l$, а магнитное поле — в широких «ушах» размером $a \times b$ (см. рис. 5). Для частоты щелевого резонанса запишем следующую формулу:

$$f_0 = 1 / (2\pi \sqrt{L_0 C}), \quad (3)$$

где $L_0 = \mu_0 ab / t$, $C = \epsilon_0 t (\alpha + k)$ — индуктивность и емкость щели соответственно, $\alpha = w / 2l$. В формуле для емкости C последнее слагаемое учитывает влияние краевых эффектов [15]; значение коэффициента k подбирается таким образом, чтобы обеспечить соответствие с численными результатами. Таким образом, у щели есть четыре геометрических параметра, существенно влияющих на частоту f_0 , при определенном соотношении между которыми можно достичь условия $f_0 < f_{кр}$. В табл. 3 указаны размеры ЗС, при которых $f_0 \approx 75$ ГГц, $f_{кр} \approx 150$ ГГц. При $k = 0.82$ значения f_0 , рассчитанные по формуле, хорошо согласуются с результатами численного моделирования в программном пакете COMSOL при изменении параметров a , b , w и l в широком диапазоне.

Результаты расчета дисперсионной характеристики ЗС в COMSOL представлены на рис. 6. Видно, что +1-я гармоника является прямой, причем коэффициент замедления для нее достаточно

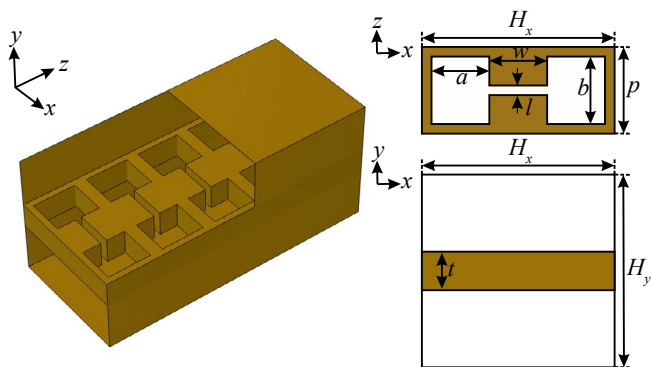


Рис. 5. Схема лестничной ЗС с гантелеобразными щелями: $a \times b$ — размеры широкого «уха», $w \times l$ — размеры узкого зазора.

Таблица 3. Геометрические параметры ЗС с гантелеобразными щелями W-диапазона

Геометрический параметр	Значение, мм
$H_x \times H_y$	1.00 × 1.00
t	0.20
p	0.45
$a \times b$	0.30 × 0.35
$w \times l$	0.30 × 0.05

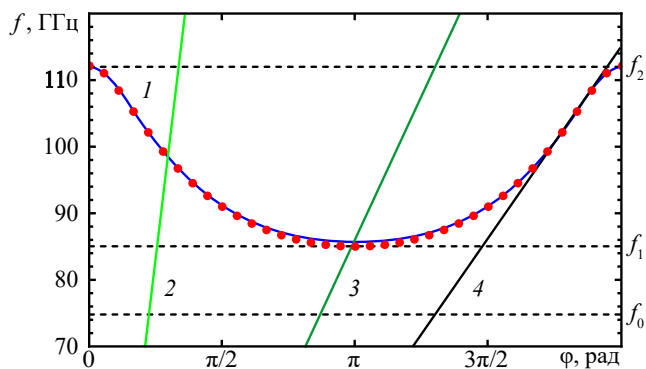


Рис. 6. Дисперсионная характеристика основной моды ЗС с гантелеобразными щелями W-диапазона: точки — результаты численного моделирования, кривая 1 — теоретическая зависимость при $f_{пл} = 82$ ГГц, 2 — линия скорости света, 3 и 4 — линии пучка при ускоряющих напряжениях 18 и 7.8 кВ соответственно, f_1 и f_2 — нижняя и верхняя частота отсечки соответственно.

слабо зависит от частоты, так что при ускоряющем напряжении пучка около 8 кВ обеспечивается синхронизм в широкой полосе частот.

Как уже отмечалось, при $f_0 < f_{кр}$ ЗС начинает проявлять свойства левой среды. Дисперсионную характеристику ЗС можно рассчитать теоретически, основываясь на теории Друде–Лоренца [5,6,9,13]. Эффективная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды зависят от частоты f следующим образом:

$$\mu_{эф}(f) = 1 - f_{кр}^2 / f^2, \epsilon_{эф}(f) = 1 - f_{пл}^2 / (f^2 - f_0^2). \quad (4)$$

Здесь $f_{пл}$ — так называемая плазменная частота метаматериала. Видно, что $\mu_{эф}(f) < 0$ при $f < f_{кр}$, а $\epsilon_{эф}(f) < 0$ при $f_0 < f < \sqrt{f_0^2 + f_{пл}^2}$.

С учетом периодичности структуры можно записать следующую формулу для сдвига фаз на период структуры φ :

$$\varphi(f) = 2 \arcsin \left(\pi p f \sqrt{\epsilon_{эф} \mu_{эф}} / c \right). \quad (5)$$

Результаты расчета дисперсионной характеристики по формуле (5) (см. рис. 6, кривая 1), хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования, если принять $f_{пл} \approx 82$ ГГц.

Отметим, что плазменная частота $f_{пл}$ наиболее существенно зависит от толщины зазора l . Увеличение l от нескольких десятков до сотни микрон приводит к возрастанию плазменной частоты $f_{пл}$ почти в два раза. При этом полоса пропускания ЗС расширяется и смещается в область более высоких частот. Так, при $l = 10$ мкм полоса пропускания ЗС лежит в диапазоне 47...61 ГГц, а при $l = 100$ мкм — в диапазоне 106...143 ГГц.

4. ЛЕСТНИЧНАЯ ЗС В ВОЛНОВОДЕ С ПАЗАМИ

Альтернативным способом достижения условия $f_0 < f_{кр}$ в лестничных ЗС является повышение критической частоты волновода. Такая ситуация наблюдается, например, в волноводе, нагруженном продольными пазами [3,16]. Схема лестничной ЗС в волноводе с продольными пазами сечением $g \times h$ показана на рис. 7, а основные размеры приведены в табл. 4. Если щели в пластине отсутствуют, то ЗС вырождается в два однородных вдоль оси z изолированных Т-образных волноводов, расположенных сверху и снизу пластины (см. рис. 7).

Расчеты частоты отсечки такого волновода были проведены в пакете COMSOL в двумерной постановке. В отсутствие паза частота отсечки $f_{кр}$ прямоугольного волновода равна 85.7 ГГц. Расчеты показали, что при увеличении глубины паза h частота отсечки монотонно возрастает, однако при

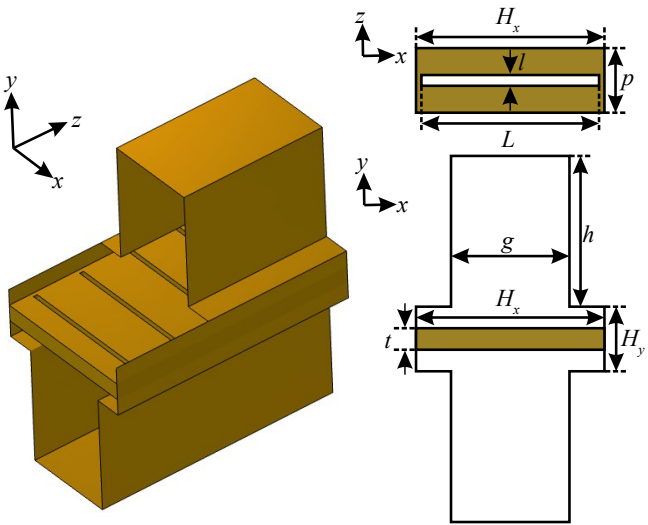


Рис. 7. Схема лестничной ЗС в волноводе с пазами: $g \times h$ — размеры паза.

Таблица 4. Геометрические параметры ЗС в волноводе с пазами W-диапазона

Геометрический параметр	Значение, мм
$H_x \times H_y$	1.75×0.60
t	0.20
p	0.6
$L \times l$	1.65×0.10
$g \times h$	1.10×1.40

$h > 1$ мм меняется слабо (рис. 8а). Зависимость частоты отсечки от ширины паза g (рис. 8б) имеет явно выраженный максимум, когда g несколько превышает половину ширины волновода (при выбранных размерах это имеет место при $g \approx 1100$ мкм). Были выбраны такие размеры пазов (см. табл. 4), при которых $f_{кр}$ повышается примерно до 112 ГГц, что превышает частоту $f_0 = 90.8$ ГГц.

Результаты расчета дисперсионной характеристики ЗС представлены на рис. 9. Видно, что широкополосное усиление возможно на +1-й пространственной гармонике при ускоряющих напряжениях порядка 13 кВ. Отметим, что полоса пропускания основной моды находится в области частот, в которой эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости отрицательны. Нижняя граница полосы пропускания близка к частоте f_0 , а верхняя граница, как и для описанных выше метаматериальных ЗС, определяется формулой $f_2 = \sqrt{f_0^2 + f_{пл}^2} \approx 108.9$ ГГц, где плазменная частота $f_{пл} \approx 60$ ГГц.

Как и в случае ЗС с гантелеобразными щелями, плазменная частота растет при увеличении про-

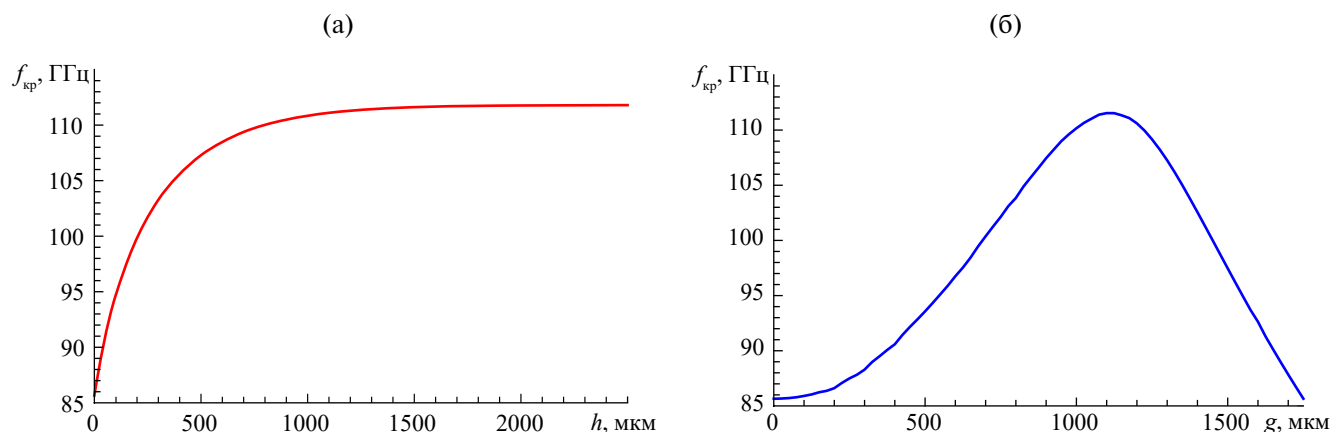


Рис. 8. Зависимость критической частоты Т-образного волновода $f_{кр}$ от глубины паза h при $g = 1.1$ мм (а) и от ширины паза g при $h = 1.4$ мм (б).

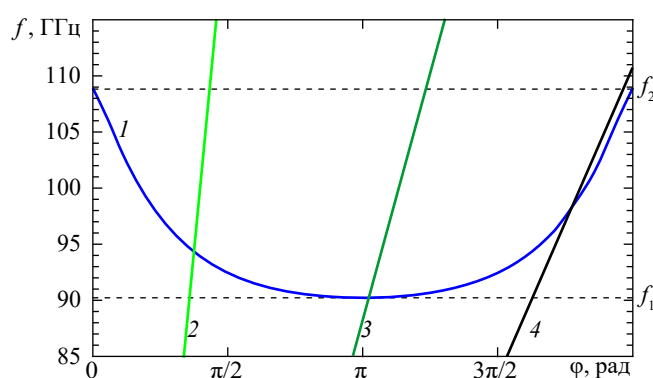


Рис. 9. Дисперсия основной моды ЗС в волноводе с пазами, разработанной для W-диапазона (1), линия скорости света (2) и линии пучка при ускоряющих напряжениях 35 (3) и 12.7 кВ (4).

дольного размера щели l . Соответственно, при этом полоса пропускания расширяется. Однако верхняя граничная частота f_2 растет только до тех пор, пока не сравняется с частотой отсечки волновода $f_{кр} \approx 112$ ГГц. Действительно, как следует из формул, при $f > f_{кр}$ эффективная магнитная проницаемость становится положительной и ЗС перестает демонстрировать свойства дважды отрицательного метаматериала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлены результаты анализа дисперсионных характеристик ЗС W-диапазона, которые представляют собой модификации лестничной ЗС. Повышение частоты щелевого резонанса или понижение критической частоты волновода приводит к тому, что ЗС начинает проявлять свойства дважды отрицательного метаматериала. При этом в широкой полосе частот возможен синхронизм с попутной электромагнитной

волной при напряжениях пучка порядка 8...13 кВ. Использование аналогии с дважды отрицательным метаматериалом позволяет получить простые оценочные выражения для дисперсионной характеристики, что облегчает проектирование ЗС.

Отметим, что ЗС, представленные в данной работе, могут быть изготовлены при помощи технологии прецизионной лазерной резки импульсами наносекундной или пикосекундной длительности [17,18].

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paoloni C. // IEEE Commun. Magaz. 2021. V. 59. № 5. P. 102. doi: 10.1109/MCOM.001.2000326
2. Григорьев А.Д. Терагерцевая электроника. М.: Физматлит, 2020.
3. Альтишулер Ю.Г., Татариенко А.С. Лампы малой мощности с обратной волной. М.: Сов. радио, 1963.
4. Гершензон Е.М., Голант М.Б., Негирев А.А., Савельев К.С. Лампы облатной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Под ред. Н.Д. Девяткова. М.: Радио и связь, 1985.
5. Duan Z., Shapiro M.A., Schamiloglu E. et al. // IEEE Trans. 2019. V. ED-66. № 1. P. 207. doi: 10.1109/TED.2018.2878242
6. Hummelt J.S., Lewis S.M., Shapiro M.A., Temkin R.J. // IEEE Trans. 2014. V. PS-42. № 4. P. 930. doi: 10.1109/TPS.2014.2309597
7. Hummelt J. S., Lu X., Xu H. et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. № 23. P. 237701. doi: 10.1103/PhysRevLett.117.237701
8. Lu X., Stephens J.C., Mastovsky I. et al. // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. № 2. P. 023102. doi: 10.1063/1.5016545

9. High Power Microwave Sources and Technologies Using Metamaterials / Ed. J.W. Luginsland et al. N.Y.: Wiley-IEEE Press, 2021.
10. Jiang S., Tang X., Huang S. et al. // IEEE Trans. 2023. V. ED-70. № 3. P. 1306. doi: 10.1109/TED.2022.3233814
11. Karp A. // Proc. IRE. 1957. V. 45. № 4. P. 496. doi: 10.1109/JRPROC.1957.278439
12. Berry D., Deng H., Dobbs R. et al. // IEEE Trans. 2014. V. ED-61. № 6. P. 1830. doi: 10.1109/TED.2014.2302741
13. Вендик И.Б., Вендик О.Г. // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 1. С. 3.
14. Yurt S.C., Elfrgani A., Fuks M.I. et al. // IEEE Trans. 2016. V. PS-44. № 8. P. 1280. doi: 10.1109/TPS.2016.2535305
15. Catalan-Izquierdo S., Bueno-Barrachina J.-M., Cañas-Peñuelas C.-S., Cavallé-Sesé F. // Renew. Energies & Power Quality J. 2009. V. 1. № 7. P. 613. doi: 10.24084/repqj07.451
16. Butcher P.N. // Proc. IEE. 1957. V. 104. Pt. B. № 14. P. 169. doi: 10.1049/pi-b-1.1957.0132
17. Starodubov A.V., Galushka V.V., Ryskin N.M. et al. // Proc. 2023 24th Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC). Chengdu 25-28 Apr. N.Y.: IEEE, 2023. Paper No. 10157320. doi: 10.1109/IVEC56627.2023.10157320
18. Торгашов Р.А., Ножкин Д.А., Стародубов А.В., Рыскин Н.М. // РЭ. 2023. Т. 68. № 10. С. 992. doi: 10.31857/S0033849423100182

METAMATERIAL-INSPIRED SLOW-WAVE STRUCTURES FOR W-BAND TRAVELING-WAVE TUBES

A. A. Rostuntsova^{a, b, *}, E. E. Kolesnichenko^{a, b}, N. M. Ryskin^{a, b}

^a *Saratov Branch Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS,
38 Zelenaya St., Saratov, 410019 Russia*

^b *Saratov State University,
83 Astrakhanskaya St., Saratov, 410012 Russia*

^{*}*E-mail: rostuncova@mail.ru*

Received April 26, 2023, revised May 22, 2024, accepted May 25, 2024

Electromagnetic parameters of the ladder-type slow-wave structures (SWS) formed by a metal plate with periodically arranged slots of a certain shape placed in a waveguide are studied. Modifications of the ladder-type SWS associated with the complication of the slot shape or the waveguide shape are proposed in such a way that the frequency of the slot resonance is lower than the cutoff frequency of the waveguide, and the SWS exhibits the properties of a double-negative metamaterial. It is shown that the fundamental spatial harmonic is backward, while the +1st harmonic acquires normal dispersion and the beam-wave synchronism is possible in a sufficiently wide frequency band. SWS with dumbbell-shaped slots and SWS in a groove-loaded waveguide are designed for W-band traveling-wave tube (75...110 GHz) with a relative bandwidth of about 25% and operating voltages of 8...13 kV. In such structures, there is the possibility of interaction of a slow wave with two sheet electron beams propagating from above and below the plate.

Keywords: slow-wave structure, metamaterial, traveling-wave tube, millimeter band