

УДК 621.385.632

УВЕЛИЧЕНИЕ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ И РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЛБВ¹

Ю. Н. Пчельников¹, А. Ю. Мирошниченко², Н. А. Акафьева²

¹Scientific Application International Corporation, MCLEAN, VA, 22102, USA

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Получена 13 июня 2013 г.

Аннотация. В работе рассматривается возможность повышения выходной мощности и увеличения рабочей частоты широкополосных ЛБВ. Предложены варианты и модификации замедляющих систем с уменьшенной периодичностью, что позволяет использовать их при увеличенных напряжениях электронного потока без возбуждения на обратной волне.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, замедляющая система, поток электронов, дисперсионная характеристика, взаимодействие.

Abstract: We consider the possibility of increasing the output power and increase of the operating frequency broadband TWT. The variants and modifications of a slow-wave structure with a reduced periodicity, allowing using them with an increased voltage of the electron beam without excitation on the backward wave are presented.

Keywords: traveling-wave tube, slow-wave structure, electron beam, dispersion characteristics, interaction.

Введение

Под определение широкополосные ЛБВ будем относить лампы с двухэлектродной замедляющей системой (ЗС), начиная со спирали и её

¹Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.0909 «Исследование физических процессов в мощных многолучевых СВЧ электровакуумных приборах с электродинамическими системами, выполненными на основе многомодовых резонаторов», а также при поддержке «Navy Research Laboratory» (США).

модификаций, таких как «кольцо-стержень», «кольцо-кольцо» и др., т.е. ЗС, не имеющие низкочастотной отсечки. При этом независимо от типа ЗС, её размеров и рабочего диапазона волн, средняя частота всегда соответствует приблизительно одному и тому же значению произведения поперечной постоянной γ на радиус a или высоту h соответственно цилиндрического или прямоугольного пролётного канала. Для цилиндрического канала γa порядка $1 \div 1.5$, для прямоугольного – несколько меньше. Увеличение рабочей частоты сопровождается увеличением поперечной постоянной γ и, следовательно, уменьшением радиуса или высоты пролётного канала со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Как известно, полоса усиления ЛБВ ограничивается дисперсией ЗС, а также зависимостью коэффициента связи замедленной волны с электронным потоком (ЭП) от параметра γa или γh . Применение продольно-проводящего экрана [1] или диэлектрических опор специальной формы [2] позволяет уменьшать наклон дисперсионной характеристики, расширяя полосу усиления до двух-трёх октав [3]. Однако так как уменьшение дисперсии обычно сопровождается уменьшением коэффициента связи, то приходится искать компромисс между этими параметрами.

Более серьёзной проблемой является ограничение рабочего напряжения ЭП, а, следовательно, выходной мощности и рабочей частоты, величиной, которая в случае спиральных ЛБВ лишь немногим превышает 10 кВ [4], ограничение, вызванное самовозбуждением на обратной волне. Применение резонансных поглотителей [5], а также существенное уменьшение радиуса ЭП позволяет поднять рабочее напряжение вплоть до 20 кВ. Однако при этом происходит как ограничение полосы усиления, так и уменьшение эффективности взаимодействия ЭП с усиливаемой волной.

I. Цилиндрический поток электронов

1. Предельное напряжение

При заданном интервале значений параметра γa , радиус пролётного канала a тем больше, чем меньше замедление N , т.е. больше напряжение ЭП U_0 . Полагая $\gamma \approx \beta$, где β - фазовая постоянная, и параметр βa на коротковолновом краю рабочего диапазона равным двум, находим

$$\gamma a \approx \beta a = \frac{2\pi a}{\lambda} N = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \frac{505}{\sqrt{U_0}} = 2, \quad (1)$$

где λ - длина волны в свободном пространстве.

С учётом того, что равенство скоростей нулевой и минус первой пространственных гармоник происходит приблизительно при $\lambda = 4\pi a$, получим из соотношения (1) потенциал ЭП, при котором работа без возбуждения уже невозможна

$$U_0 \approx 16 \text{ кВ}, \text{ т.е. } N = 4 \quad (2)$$

Не останавливаясь на упомянутых выше полиативных решениях, в виде резонансных поглотителей и уменьшения радиуса ЭП, отметим, что избежать возбуждения на минус первой гармонике можно уменьшая период ЗС при сохранении или уменьшении замедления.

2. Модифицированные спирали

К существенному уменьшению замедления при сохранении продольной периодичности приводит замена спирали системой «кольцо-перемычка». Однако при этом наклон дисперсионной характеристики существенно увеличивается. Хотя применение такой ЗС и позволило поднять выходную мощность ЛБВ, азимутальная периодичность, создаваемая перемычками, приводит к неустойчивой работе уже при напряжении порядка 20 кВ. Замена перемычек наклонёнными к оси кольцами позволяет уменьшить период системы вдвое и значительно повысить рабочее напряжение.

На рис. 1 приведены дисперсионные характеристики макетов обеих упомянутых ЗС и показана их конфигурация. Для сравнения показана зависимость замедления от параметра γa , полученная для обычной спиральной ЗС с теми же геометрическими размерами, что и модифицированные спирали. Из рис. 1 видно, что при представляющих практический интерес значениях параметра γa порядка $1 \div 2$, замедление волны в ЗС "кольцо-кольцо" приблизительно в полтора раза меньше чем в спирали при вдвое меньшем периоде. При этом наклон дисперсионной характеристики относительно небольшой.

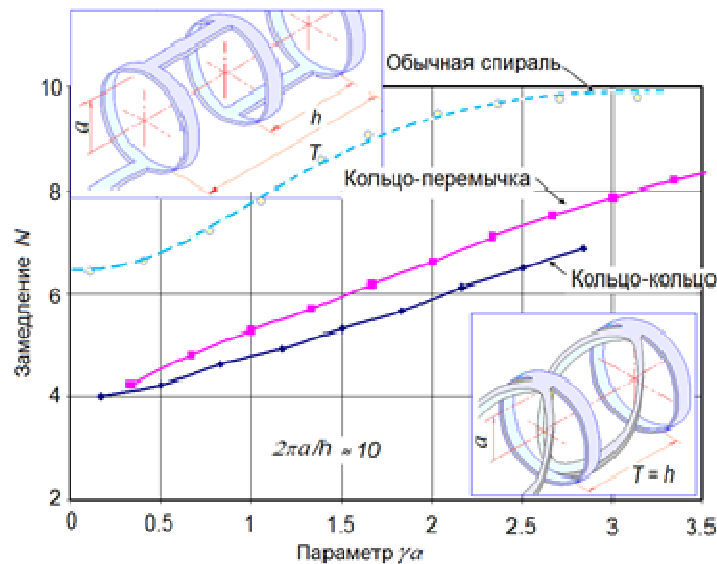


Рис. 1. Дисперсионные характеристики (зависимость замедления от параметра γa) спирали со средним радиусом a в цилиндрическом экране с радиусом $2.3a$ (пунктирная кривая) и характеристики модифицированных спиралей в экране с теми же значениями радиуса и шага и тем же экраном (сплошные кривые)

3. Спираль в азимутально-проводящем экране

На рис. 2 показана модель спиральной ЗС с азимутально-проводящим экраном радиуса b и изотропным экраном радиуса d . Возбуждаемый в кольцах ток уменьшает индуктивность спирали и, следовательно, замедление, что при сохранении той же периодичности (шага), позволяет поднять рабочее напряжение (дисперсионные характеристики на рис. 3). Следует отметить, что в отличие от экрана с продольной проводимостью, уменьшающего связь с ЭП,

наличие колец, как это показано в работе [6], приводит к увеличению этой связи. Это позволяет уменьшить радиус изотропного экрана и улучшить фокусировку ЭП.

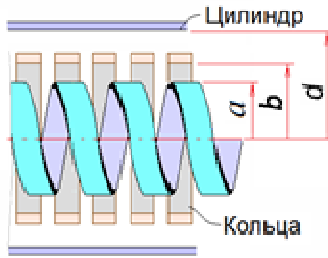


Рис. 2. Спираль в кольцах

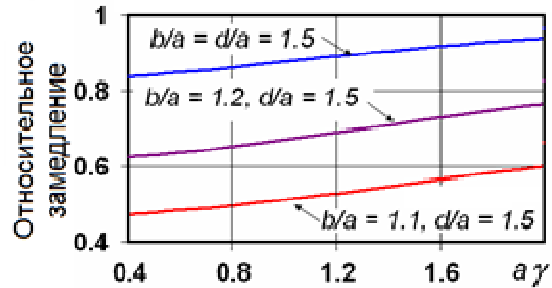


Рис. 3. Относительное замедление

На рис. 4 показана спираль, установленная через диэлектрические прокладки в проводящие кольца, закреплённые диэлектрическими опорами в изотропном экране. Реальная ЗС отличается от модели конечной шириной колец и, следовательно, величиной возбуждаемого в них тока. Это позволяет располагать относительно узкие кольца близко к спирали, не вызывая слишком большого уменьшения замедления.

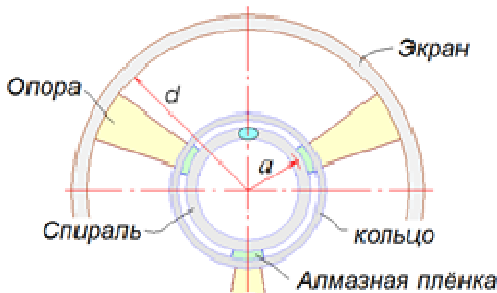


Рис. 4. Спираль в кольцах

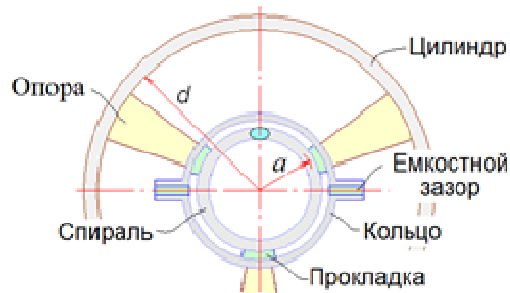


Рис. 5. Спираль в кольцах с зазорами

При введении в кольца емкостных зазоров (рис. 5), влияние колец несколько уменьшается на низкочастотном краю рабочего диапазона и увеличивается с ростом частоты, уменьшая наклон дисперсионной характеристики вплоть до появления аномальной зависимости [7].

4. Поперечные опоры

Применение колец существенно упрощается при использовании для их крепления диэлектрической втулки с кольцевыми пазами или набора диэлектрических колец с разными диаметрами (рис. 6) [8]. Вызываемая диэлектрическими кольцами разной высоты анизотропия сопровождается уменьшением наклона дисперсионной характеристики (рис. 7), добавление металлических колец – уменьшением замедления.

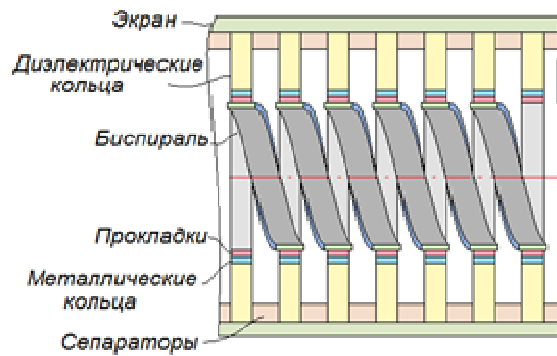


Рис. 6. Модель спиральной ЗС в азимутально-проводящем экране с кольцевыми опорами

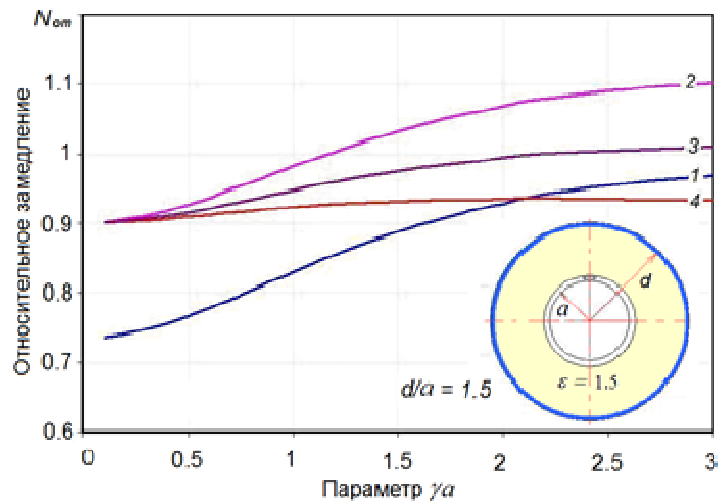


Рис. 7. Дисперсионные характеристики спирали в экране: 1 - без заполнения диэлектриком; 2 – с диэлектрическим заполнением снаружи спирали с относительной проницаемостью $\epsilon = 1.5$; 3 – анизотропный диэлектрик с радиальной проницаемостью $\epsilon_r = 1.5$ и продольной проницаемостью $\epsilon_z = 1.1$; 4 - при $\epsilon_r = 1.5$, $\epsilon_z = 1$; значения ϵ усреднены по длине

5. Биспираль в азимутально-проводящем экране

При исследовании спирали в азимутально-проводящем экране выяснилось, что такой экран не только уменьшает замедление и улучшает взаимодействие с полем синфазной волны, но и увеличивает замедление противофазной волны, одновременно уменьшая продольное электрическое поле. Таким образом, происходит не только рассинхронизм волн, но и существенное уменьшение взаимодействия противофазной моды обратной волны с ЭП, исключая самовозбуждение на обратной волне. Возбуждение на минус первой гармонике синфазной волны также исключается благодаря вдвое меньшей периодичности (вплоть до замедления равного $2 \div 2.5$).

На рис. 8 приведены экспериментальные зависимости замедления N от параметра μa , полученные на макетах двухзаходной спирали с теми же поперечными размерами и при той же технологии изготовления, что и макеты ЗС, показанные на рис. 1. Кольца установлены над каждым витком спиралей, ширина колец составляет половину периода и приблизительно равна ширине витков спиралей. При этом период такой ЗС вдвое меньше шага каждой из спиралей.

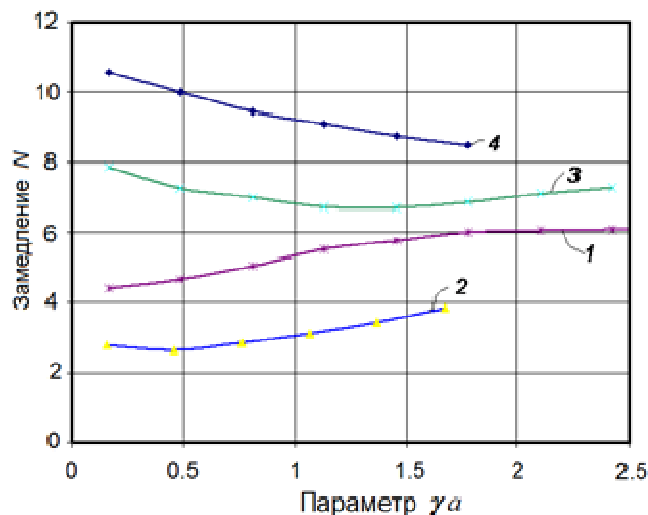


Рис. 8. Экспериментальные зависимости замедления N от параметра μa :

- 1 – синфазная мода в спирали без колец; 2 – синфазная мода в спирали с кольцами; 3 – противофазная мода в спирали без колец; 4 – противофазная мода в спирали с кольцами

Для разработки реальных ЛБВ на биспиралях с экраном из колец потребуется оптимизация ширины колец, зазора между спиралями и кольцами, включая выбор материала прокладок и технологии изготовления. Из рис. 8 видно, что кольца почти вдвое уменьшают замедление синфазной волны, существенно увеличивая замедление противофазной волны. Это делает возможным стабильную работу ЛБВ с такой ЗС при напряжениях $40 \div 60$ кВ.

6. Биспираль с кольцевыми связками

Для устранения самовозбуждения на противофазной волне спирали соединяют кольцевыми связками [9]. При этом замедление становится значительно меньше, а наклон дисперсионной характеристики существенно увеличивается. Проведенные исследования показали, что уменьшая толщину связок, т.е. увеличивая их индуктивность, можно улучшить дисперсию и несколько увеличить замедление (рис. 9).

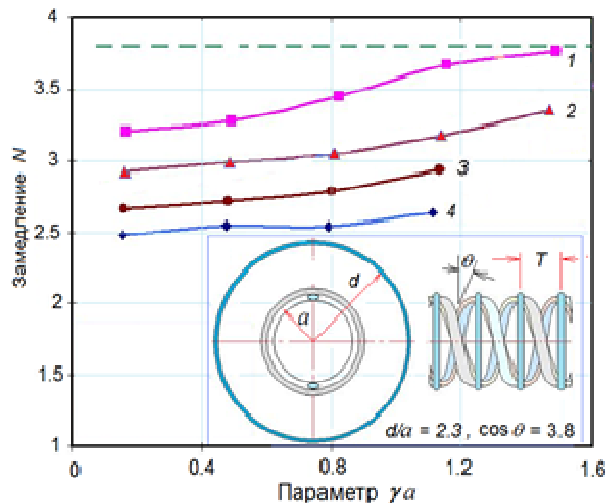


Рис. 9. Дисперсионные характеристики биспиральи в изотропном экране с радиусом $d = 2.3a$ и периодом T равным $1.16a$ без связок - 1 и со связками из проволоки разного диаметра: 2 – диаметр $g = 0.05T$; 3 – $g = 0.01T$; 4 - получена с лентой шириной равной $T/6$; пунктирная прямая соответствует геометрическому замедлению спирали, равному 3.8

7. Кольца, соединённые связками

Как оказалось, неплохой альтернативой спиральной ЗС является продольный ряд колец, соединённых спиральными, наклонными или

продольными связками [10, 11]. Основная особенность таких ЗС в небольшой зависимости замедления от периода. Это позволяет получать сколь угодно малую периодичность при относительно небольших замедлениях, т.е. возможность работать при напряжениях значительно превышающих 10 кВ.

На рис. 10 показана ЗС в виде колец, соединённых двумя спиралями, радиус b , которых, по крайней мере, вдвое меньше радиуса a колец. На рис. 11 показана дисперсионная характеристика такой ЗС в сравнении с характеристикой обычной спирали с тем же пролётным каналом и вдвое большим шагом. Из рисунка видно, что периодичность колец, соединённых спиралями существенно меньше периодичности спирали при несколько меньшем замедлении и почти таком же наклоне дисперсионной характеристики. Периодичность определяется отношением сдвига фазы на период к π .

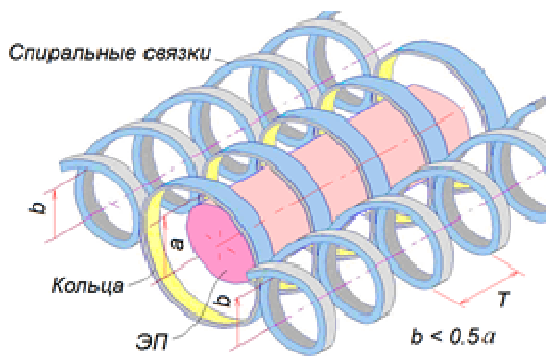


Рис. 10. Модель ЗС
«кольца связанные спиралями»

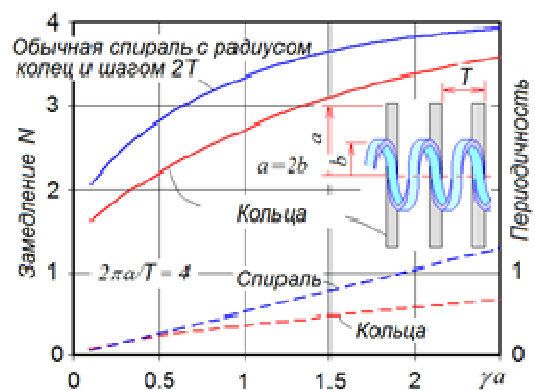


Рис. 11. Дисперсионные характеристики и периодичность соединённых спиралями колец и обычной спирали (эксперимент)

II. Ленточный поток электронов

При увеличении рабочей частоты электрическое поле замедленной волны концентрируется около поверхности спирали, уменьшаясь на оси, т.е. в цилиндрическом ЭП. Поэтому ЛБВ с трубчатым ЭП, в частности цэфотроны, успешно работали на относительно высоких частотах при значениях параметра γa больших двух [8]. Сплющивание спирали и применение ленточного потока,

казалось бы, должно было позволить увеличить связь с ЗС на высоких частотах и, тем самым, увеличить предельные частоты ЛБВ. Последние работы Л.Н. Лошакова с его учениками были посвящены анализу ЛБВ с эллиптической спиралью [12, 13]. Предполагалось, что использование ленточного ЭП позволит увеличить ток при относительно малом напряжении и увеличить рабочую частоту. К сожалению, в случае прямоугольной спирали синхронизм нулевой и минус первой пространственных гармоник наступает при большем замедлении, чем в случае цилиндрической спирали, что практически исключает применение спирали в ЛБВ с ленточным ЭП. В этом случае на смену спирали приходят штыревые ЗС, такие в частности как связанные штыревые гребёнки (рис. 12) [14] или обычные гребёнки (рис. 13) и др. [15].

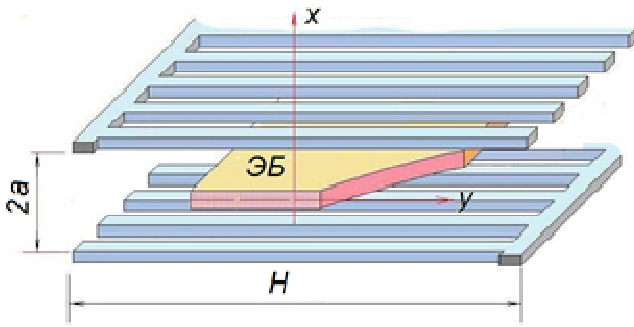


Рис. 12. Связанные штыревые гребёнки

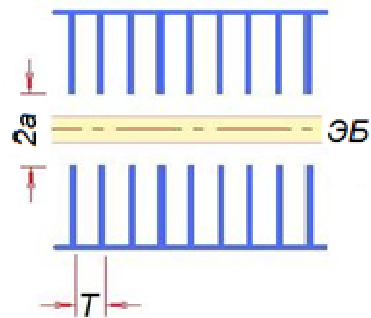


Рис. 13. Связанные гребёнки

Отличительной особенностью связанных ЗС является возможность возбуждения как синфазной, так и на противофазной мод, т.е. осуществлять, как продольное, так и поперечное взаимодействие с ЭП.

1. Связанные импедансные проводники

В отличие от биспирали, обеспечивающей близкое к геометрическому замедление как синфазной, так и противофазной волны, ЗС, образованные параллельными импедансными проводниками с конфигурацией в виде зеркальных отображений друг друга, вызывают существенно меньшее, чем геометрическое замедление синфазной и существенно большее замедление противофазной волны. При этом продольное электрическое поле

противофазной волны проходит через ноль в продольной плоскости симметрии. Таким образом, такие ЗС можно использовать как для продольного, так и для поперечного взаимодействия.

Сказанное подтверждается приведенными на рис. 14 дисперсионными характеристиками связанных штырей шириной H . Даже при относительно большой высоте пролётного канала, равной $0.3H$, т.е. при относительно слабой связи между проводниками, значения замедления отличаются почти вдвое. Аналогичные зависимости имеют место и для других связанных ЗС.

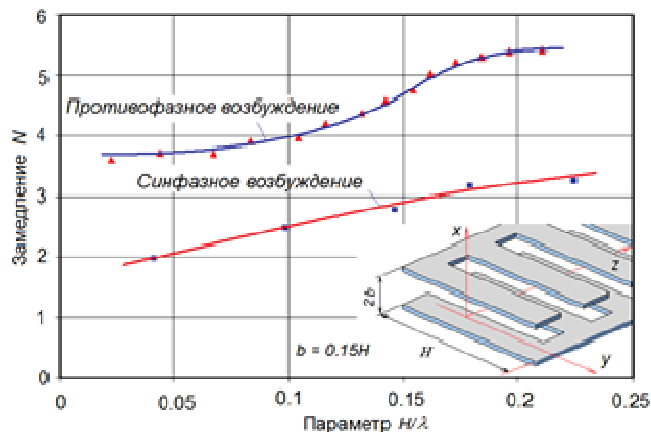


Рис. 14. Дисперсионные характеристики ЗС связанные штыри.

Хотя синфазная и противофазная моды в связанных ЗС отличаются величиной замедления, в некоторых случаях возникает необходимость подавления противофазной моды. Сделать это можно с помощью поперечных связок по краям импедансных проводников.

2. ЗС «прямоугольные кольца»

Введение поперечных связок возвращает нас к ЗС, образованными связанными в продольном направлении кольцами, с той лишь разницей, что эти кольца имеют прямоугольное сечение. В результате была предложена показанная на рис. 15 новая ЗС, «наклонно-связанные прямоугольные кольца» [16]. Соединённые наклонными связками, кольца имеют достаточно малую периодичность при рабочих напряжениях порядка $20 \div 40$ кВ, обеспечивая

хорошее взаимодействие с ЭП в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн благодаря малой высоте пролётного канала.

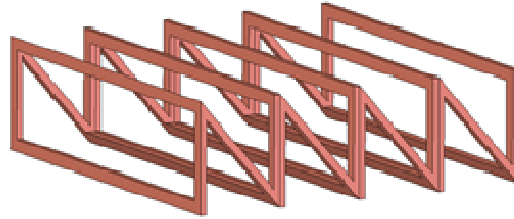


Рис. 15. ЗС типа наклонно-связанные прямоугольные кольца.

Проводники с узкой стороны колец образуют индуктивность, в то время как проводники сверху и снизу – ёмкость. Выбором размеров можно обеспечить равенство фазовой скорости (ω/β) и скорости ЭП. Кроме того, период может быть намного меньше того, при котором возможно возбуждение на обратной волне. Существенное преимущество такой ЗС в простоте изготовления (фрезеровкой конических пазов в прямоугольном волноводе).

Из рис. 16 видно, что в предложенной ЗС взаимодействие ЭП с продольным электрическим полем замедленной волны возможно лишь на основной (нулевой) моде. Следующие две моды не только практически не связаны с ЭП но, как это видно из дисперсионных характеристик, приведенных на рис. 17, далеки от синхронизма с нулевой модой.

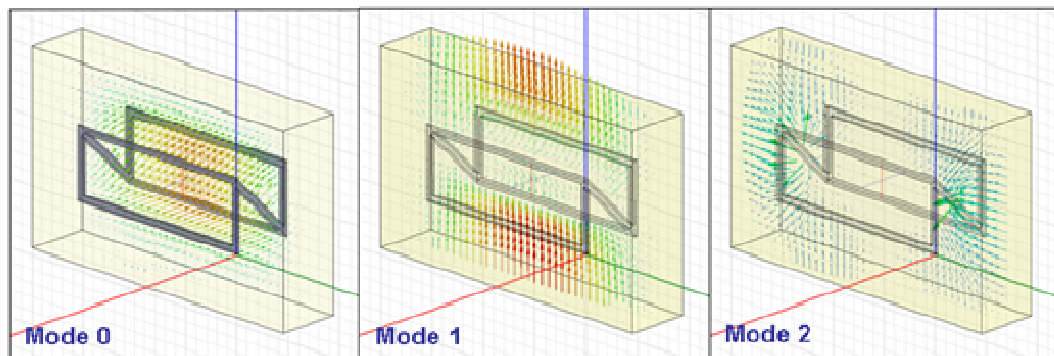


Рис. 16. Распределение электрического поля для разных мод в ЗС "наклонно-связанные прямоугольные кольца" (из работы [16]).

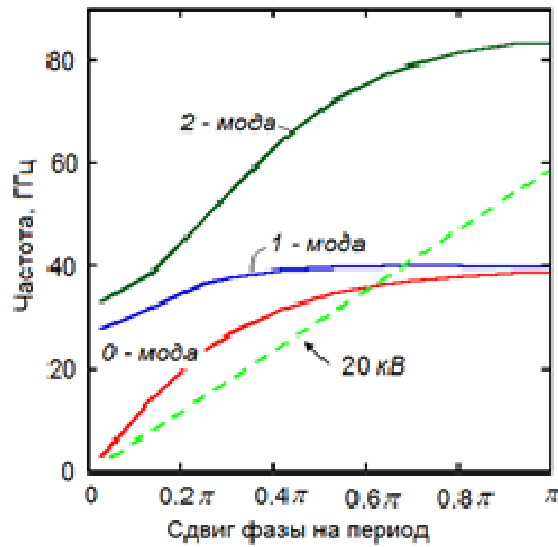


Рис. 17. Зависимости частоты от сдвига фазы на период, рассчитанные для трёх низших мод (из работы [16]).

3. Прямоугольный волновод со щелями

Боле простой, чем рассмотренная выше ЗС, является прямоугольный волновод со щелями (рис. 18) [17]. Несмотря на, казалось бы, короткое замыкание колец в продольном направлении, индуктивность связей и взаимная ёмкость колец обеспечивают замедление волны в достаточно широком диапазоне частот.

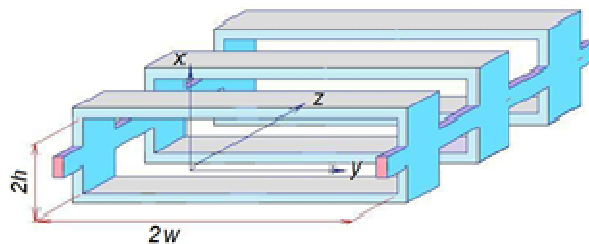


Рис. 18. Прямоугольный волновод со щелями

Приведенные на рис. 19 зависимости замедления от параметра μ рассчитаны для трёх разных отношений ширины волновода к половине его высоты h . Расстояние до экрана выбрано равным h . Точками показаны результаты измерений, полученные для $H/h = 3$.

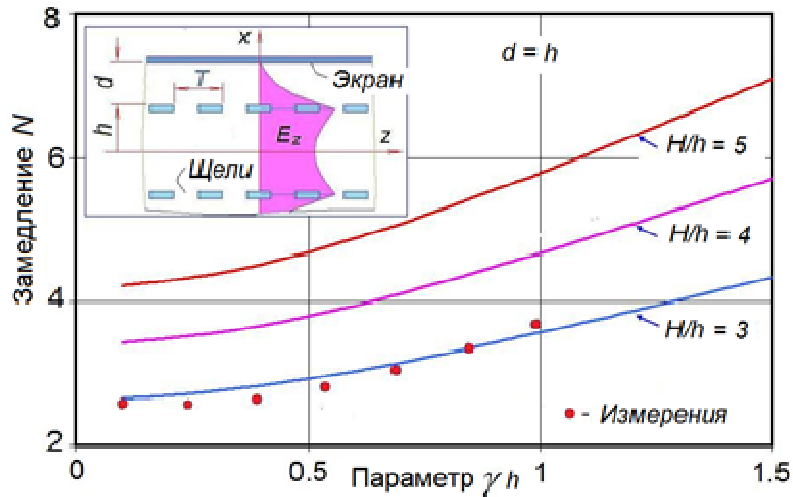


Рис. 19. Дисперсионные характеристики волновода со щелями.

Заключение

На основании проведенных исследований показана возможность дальнейшего увеличения выходной мощности и рабочей частоты широкополосных ЛБВ.

Предложены варианты и модификации замедляющих систем с уменьшенной периодичностью, что позволяет использовать их при увеличенных напряжениях электронного потока без возбуждения на обратной волне.

Результаты анализа, компьютерного моделирования и непосредственных измерений подтверждают положительные свойства предложенных систем.

Литература

1. А.с. №324674. СССР. МПК⁶ H01J23/22. Спиральная замедляющая система / Ю.Н. Пчельников, Н.П. Кравченко. Заявка № 1444459, опуб. 01.01.1972. Бюл. № 2.
2. Тагер А.С., Солнцев В.А. Исследование дисперсии спиральной линии замедления с диэлектрическими опорами // Труды НИИ. 1955. Вып. 1. С. 21.
3. Пчельников Ю.Н., Елизаров А.А. Анализ методов увеличения выходной мощности и рабочей частоты широкополосных ламп с бегущей волной // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 9. С. 1082.

4. Лошаков Л.Н., Пчельников Ю.Н. Увеличение мощности широкополосных ламп с бегущей волной // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1978. Т. 21. № 10. С. 64.
5. Scott A., Cascone M.J. What's new in helix TWT's // International Electron Devices Meeting: Technical Digest. Washington DC, USA. 1978. P. 536-530.
6. Дёмина Г.Р., Изюмова Т.И., Пчельников Ю.Н. Влияние экрана с анизотропной проводимостью на дисперсионные свойства и коэффициент связи спиральной замедляющей линии // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1967. № 9. С. 41-49.
7. Пчельников Ю.Н., Шумская Л.П. Спираль в экране с емкостной проводимостью в азимутальном направлении // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 9. С. 1139.
8. Пчельников Ю.Н. Коррекция дисперсионной характеристики спиральной замедляющей системы в лампах с бегущей волной // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 4. С. 439.
9. Kennedy J.B., Ferguson P.E., Christensen J.A. Techniques for high average power traveling-wave tubes // Conf. Electron Device Techniques, New York City, USA. 1970. P. 71.
10. Pchel'nikov Yu.N. Novel Slow-wave structure for high voltage TWTs // International Vacuum Electronics Conference (IVEC), IEEE International Conference Publications. USA, Monterey. 2012. P. 273.
11. Пчельников Ю.Н., Мирошниченко А.Ю. Замедляющая систем «продольно-связанные кольца» // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: 2012. С. 196-203.
12. Лошаков Л.Н., Шумская Л.П., Иванова Н.Е. К расчёту медленной волны в спиральной линии с эллиптическим сечением // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. № 11. С. 2286.
13. Лошаков Л.Н., Шумская Л.П. Расчёт параметров связи электронного потока с полем спирали эллиптического сечения // Радиотехника. 1983. № 12. С. 72.

14. Пчельников Ю.Н., Виноградов А.И., Пчельников А.Г. Исследование штыревых замедляющих систем // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. №3. С. 267.
15. Pchel'nikov Yu.N. The sheet electron beam interaction with the in-phase mode in the opposing combs // International Vacuum Electronics Conference (IVEC), IEEE International Conference Publications. USA, Monterey. 2010. P. 457.
16. Pchel'nikov Yu.N., Abe D.K. A novel millimeter-wave slow-wave structure for longitudinal interaction with a sheet electron beam // International Vacuum Electronics Conference (IVEC), IEEE International Conference Publications. USA, Monterey. 2010. P. 495.
17. Pchel'nikov Yu.N. Slow-wave structure formed by rectangular rings // International Vacuum Electronics Conference (IVEC), IEEE International Conference Publications. Rome, Italy. 2009. P. 235.