

12;13

Анализ взаимодействия электромагнитной волны в замедляющей системе типа „металлический ребристый стержень“ с кольцевым потоком электронов

© А.А. Елизаров¹, Ю.Н. Пчельников², Р.В. Шаймарданов¹

¹ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Москва, Россия

² Science Applications International Corporation, McLean, USA

E-mail: a.yelizarov@hse.ru

Поступило в Редакцию 22 августа 2016 г.

Проведен анализ взаимодействия электромагнитной волны в замедляющей системе типа „металлический ребристый стержень“ с внешним кольцевым электронным потоком. Найдены выражения для эквивалентных параметров индуктивности и емкости структуры. В импедансном приближении получено дисперсионное уравнение для случая возбуждения в такой замедляющей системе аксиально-симметричной волны электрического типа. Выполнено моделирование дисперсионных характеристик и коэффициента связи в зависимости от геометрических размеров стержня и диэлектрических проницаемостей материала, заполняющего пазы структуры.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.24.45342.16466

В последнее десятилетие в ряде зарубежных публикаций была описана лампа бегущей волны с замедляющей системой на основе диэлектрического стержня, омываемого внешним кольцевым электронным пучком [1,2]. Несмотря на достигнутый коэффициент усиления, электрическая зарядка стержня за счет перехвата электронами препятствует эффективному взаимодействию пучка с полем в предлагаемом устройстве. Кроме того, коэффициент замедления диэлектрического стержня достаточно мал, и электромагнитное поле распространяется в большом объеме, в то время как амплитуда продольной компоненты электрического поля, которое взаимодействует с электронным пучком, относительно небольшая. Обоих указанных выше недостатков можно

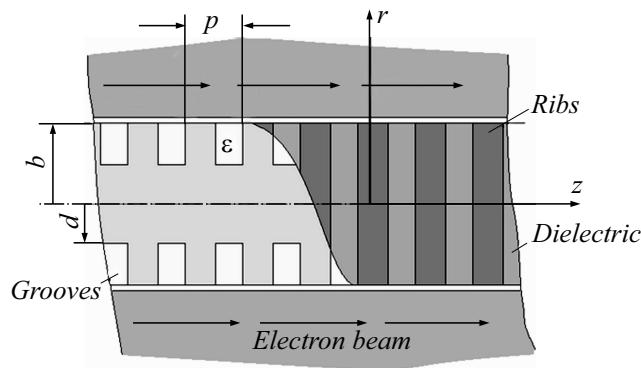


Рис. 1. Модель замедляющей системы на основе ребристого стержня, омываемого кольцевым потоком электронов.

избежать путем использования замедляющей системы на основе ребристого металлического стержня, пазы которого заполнены диэлектрическим материалом. Как показано далее, такая структура обеспечивает довольно большое замедление и эффективное взаимодействие с внешним кольцевым электронным потоком. Дополнительным преимуществом предложенной замедляющей системы является возможность обеспечения хорошего отвода тепла.

Рассмотрим замедляющую систему, представляющую собой металлический стержень радиусом b с радиальными пазами на его поверхности с внутренним радиусом d (рис. 1). Пазы заполнены диэлектрическим материалом с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ .

Для упрощения анализа будем предполагать, что исследуемая замедляющая система омывается снаружи кольцевым потоком электронов, примыкающим к поверхности структуры и имеющим бесконечно большой внешний радиус. Считая, что период пазов металлического стержня мал по сравнению с длиной волны, используем импедансное приближение только для одной, нулевой пространственной гармоники. Ограничимся анализом аксиально-симметричной волны электрического типа, компоненты которой пропорциональны $\exp(j\omega t - j\beta z)$, где ω — угловая частота, t — время, β — фазовая постоянная в направлении распространения волны, т. е. вдоль координаты z .

Заменяем рассматриваемую модель эквивалентной длинной линией [3–5], погонные параметры индуктивности L и емкости C которой удовлетворяют следующему уравнению:

$$\tau^2 = \omega^2 LC, \quad (1)$$

где τ — поперечная постоянная, связанная с фазовой постоянной β и волновым числом k соотношением

$$\tau^2 = \beta^2 - k^2, \quad k = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}. \quad (2)$$

Здесь ω — угловая частота, ε_0 и μ_0 — диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума.

Очевидно, что волна, возбужденная в ребристом стержне, распространяется в направлении z только вне области, заполненной электронами. Благодаря взаимодействию с кольцевым электронным пучком поперечная постоянная T в этой области отличается от τ [6]

$$T^2 = \tau^2 \left[1 - \frac{\beta_p^2}{(\beta - \beta_e)^2} \right], \quad (3)$$

где β_p и β_e определяются по формулам

$$\beta_p^2 = \frac{ei_0}{m\varepsilon_0u_0^3}, \quad \beta_e = \frac{\omega}{u_0}. \quad (4)$$

Здесь e , m — заряд и масса электрона, u_0 — средняя скорость электронов. В отсутствие электронного пучка $T = \tau = \tau_0$, где нижний индекс „нуль“ в обозначениях поперечной и фазовой постоянных относится к их значениям в отсутствие электронов.

В случае аксиально-симметричного поля эквивалентная погонная емкость области, окружающей ребристый стержень, может быть определена через импеданс на ее поверхности [7]. Принимая во внимание, что эта область заполнена электронами и отличается поперечной постоянной T , можно записать

$$C = \varepsilon_0 2\pi b T \frac{K_1(Tb)}{K_0(Tb)}. \quad (5)$$

В упомянутом выше импедансном приближении, применяемом к периоду пазов ребристого стержня, эквивалентная погонная индуктивность

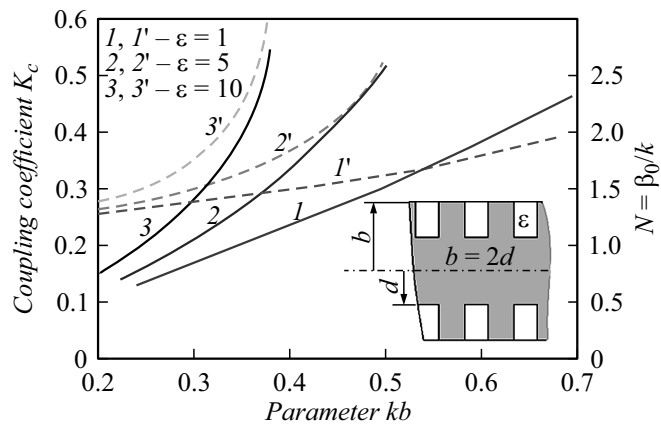


Рис. 2. Дисперсионные характеристики (штриховые кривые), полученные в виде зависимостей коэффициента замедления N от параметра kb , и характеристики коэффициента связи K_c (сплошные кривые) при $b/d = 2$ при изменении диэлектрической проницаемости ϵ .

может быть определена как

$$L = \frac{\mu_0}{\epsilon k 2\pi b} b \operatorname{tn}(kb, kd), \quad (6)$$

где

$$\operatorname{tn}(x, y) = \frac{J_0(y)N_0(x) - J_0(x)N_0(y)}{J_1(y)N_0(x) - J_0(x)N_1(y)} \quad (7)$$

— разностный тангенс [8].

Подставляя (5) и (6) в (1), получим „горячее“ дисперсионное уравнение

$$\tau^2 = \frac{kTK_1(Tb)}{\epsilon K_0(Tb)} b \operatorname{tn}(kb, kd). \quad (8)$$

Результаты решения уравнения (8), полученные с помощью программных средств MathCAD, в отсутствие электронного пучка, т. е. при $T = \tau = \tau_0$, показаны на рис. 2 в виде зависимостей коэффициента замедления N от пропорционального частоте параметра kb для различных значений ϵ (штриховые кривые). Коэффициент замедления определялся как $N = \beta_0 k$.

Несмотря на то что эффективность взаимодействия замедленной электромагнитной волны с электронным потоком часто характеризуется сопротивлением связи, более удобно использовать введенный Л.Н. Лошаковым так называемый коэффициент связи, который является безразмерной величиной и не зависит от частоты [6]. Как показано в работах [3,6,9,10], коэффициент связи может быть вычислен через производные эквивалентных параметров

$$K_c = \frac{\tau_0^2}{\beta_0^2} \frac{C'(T)/C(\tau_0)}{\frac{2}{\tau_0 b} - \frac{L'(\tau)}{L(\tau_0)} - \frac{C'(T)}{C(\tau_0)}}. \quad (9)$$

Здесь штрихи означают первые производные по аргументу. В рассматриваемом случае индуктивность L не зависит от поперечной постоянной τ и ее производная равна нулю, хотя, как следует из (5),

$$\frac{C'(T)}{C(\tau_0)} = \frac{K_1(\tau_0 b)}{K_0(\tau_0 b)} - \frac{K_0(\tau_0 b)}{K_1(\tau_0 b)}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в выражение (9), получим формулу для коэффициента связи

$$K_c = \frac{\tau^2/\beta^2}{\frac{2K_1K_0}{\tau b(K_1^2 - K_0^2)} - 1}. \quad (11)$$

Зависимости коэффициента связи K_c от параметра kb при изменении диэлектрической проницаемости материала, заполняющего пазы ребристого стержня, показаны на рис. 2 (сплошные кривые). Из рассчитанных кривых видно, что коэффициент связи является достаточно большим в широком диапазоне изменения произведения kb , пропорционального частоте.

Таким образом, в работе проведен анализ взаимодействия электромагнитной волны в замедляющей системе типа „металлический ребристый стержень“ с внешним кольцевым потоком электронов. Найдены выражения для эквивалентных погонных параметров индуктивности и емкости структуры. В импедансном приближении получено „горячее“ дисперсионное уравнение для случая возбуждения в такой замедляющей системе аксиально-симметричной волны электрического типа. С помощью программных средств MathCAD выполнено моделирование дисперсионных характеристик и коэффициента связи металлического

ребристого стержня с внешним кольцевым потоком электронов в зависимости от геометрических размеров стержня и диэлектрических проницаемостей материала, заполняющего пазы структуры. Полученные результаты могут быть использованы для создания ламп бегущей волны с повышенной выходной мощностью и эффективных облучателей зеркальных антенн.

Работа подготовлена в результате проведения исследования (№ 16-01-0061, 17-05-0009) в рамках программы „Научный фонд Национального исследовательского университета „Высшая школа экономики“ (НИУ ВШЭ) в 2016–2017 гг и с использованием средств субсидии на государственную поддержку ведущих университетов РФ в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, выделенной НИУ ВШЭ.

Список литературы

- [1] *Shlapakovski A., Jiang W., Vintizenko I.* // Proc. 7th IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC-2006). Monterey, 2006. P. 163.
- [2] *Shlapakovski A., Hadas Y., Kweller T.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38. Iss. 3. P. 474.
- [3] *Елизаров А.А., Пчельников Ю.Н.* Радиоволновые элементы технологических приборов и устройств с использованием электродинамических замедляющих систем. М.: Радио и связь, 2002. 200 с.
- [4] *Елизаров А.А., Пчельников Ю.Н.* // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 1992. № 9-10 (453-454). С. 35.
- [5] *Елизаров А.А., Пчельников Ю.Н.* // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 3. С. 261.
- [6] *Лошаков Л.Н., Пчельников Ю.Н.*, Теория и расчет усиления лампы с бегущей волной. М.: Сов. радио. 1964. 239 с.
- [7] *Елизаров А.А., Шаймарданов Р.В.* // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6. № 10. С. 54.
- [8] *Грэй Э., Мэтьюз Г.Б.* Функции Бесселя и их приложения к физике и механике. М.: ИЛ, 1953. 372 с.
- [9] *Yelizarov A.A., Pchelnikov Y.N., Shaymardanov R.V.* // Proc. 15th IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC-2014). Monterey, 2014. P. 297.
- [10] *Yelizarov A.A., Pchelnikov Y.N., Karavashkina V.N., Shaymardanov R.V.* // Proc. 16th IEEE Int. Vacuum Electronic Conf. (IVEC-2015). Beijing, 2015. P. 142.