

Электродинамические системы мощных терагерцевых электронных приборов

А.Д. Григорьев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе рассматриваются требования к электродинамическим системам вакуумных электронных приборов терагерцевого диапазона. Рассматриваются способы удовлетворения этих требований и приводятся примеры электродинамических систем

Ключевые слова: терагерцы, электронные приборы, резонаторы, замедляющие системы

1. Введение

Повышение рабочей частоты систем связи, радиолокации и других систем – основной тренд радиоэлектроники, наблюдающийся последние 120 лет. За это время максимальная несущая частота этих систем увеличилась в миллион раз, достигнув терагерцевого диапазона. При этом конструкторы приборов сталкиваются с серьезными проблемами, связанными с тем, что размеры основных элементов прибора должны быть соизмеримы с рабочей длиной волны. В полной мере это относится и к электродинамической системе прибора, создающей высокочастотное электромагнитное поле, взаимодействующее с электронным потоком и отбирающее от него часть энергии. Основные элементы ЭДС – линии передачи, резонаторные или замедляющие системы.

По мере увеличения частоты размеры элементов ЭДС уменьшаются и в терагерцевом диапазоне становятся настолько малыми, что существующие технологии не позволяют изготовить их с требуемыми допусками. Кроме того, увеличивается затухание в линиях передачи, ухудшаются параметры резонаторов и замедляющих систем.

2. Линии передачи

Обычные прямоугольные волноводы мало подходят для линий передачи терагерцевого диапазона. Их поперечное сечение слишком мало, а затухание велико. Так, волновод WR-1 с рабочим диапазоном частот 750-1100 ГГц имеет поперечные размеры $0,254 \times 0,127$ мм², максимальную передаваемую мощность на частоте 1 ТГц $P_{\max} = 115$ Вт и затухание 0.4 дБ/см. Затухание, в основном, обусловлено потерями в металлических стенках волновода. Затухание в сухом воздухе играет второстепенную роль.

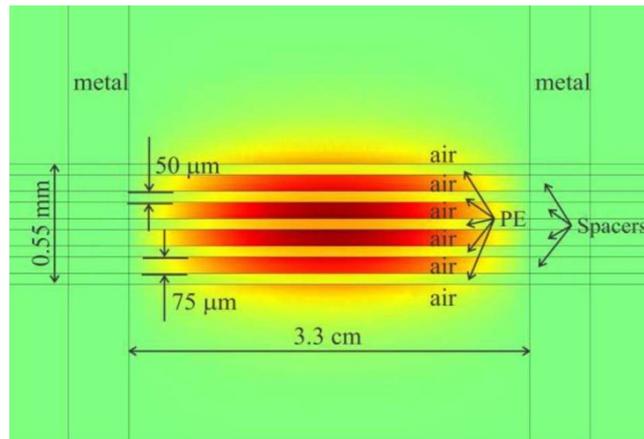


Рисунок 1. Пористый планарный волновод. Электрическое поле основного вида колебаний.

Поэтому были предложены линии передачи (ЛП) ТГц диапазона, в которых электромагнитное поле волны сосредоточено, в основном, в воздухе. В работе описывается планарный пористый волновод, предназначенный для работы в диапазоне 0,1...1,5 ТГц и состоящий из слоев полиэтилена, разделенных воздушными промежутками (Рис. 2). Толщина полиэтиленовых слоев 50 мкм, а воздушных промежутков между ними – 75 мкм, что много меньше длины волны излучения. Количество слоев может быть различным, но в работе исследовалась структура, состоящая из 4-х слоев полиэтилена. По бокам структура ограничена металлическими поверхностями.

Как видно, поле сосредоточено, в основном, в воздушных промежутках. Как показали компьютерное моделирование и эксперимент, Коэффициент передачи отрезка волновода длиной 11 см менялся от 1 на частоте 0.1 ТГц до 0,1 на частоте 1,5 ТГц. К достоинствам такой ЛП относится возможность изменения ширины волновода при сохранении основной моды. Тем самым появляется возможность передачи больших мощностей.

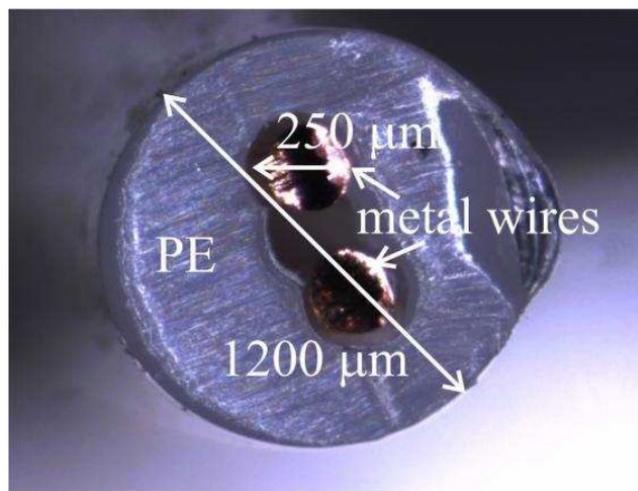


Рисунок 2. Двухпроводный волновод ТГц диапазона

Другой тип ЛП ТГц диапазона описан в работе [2, 3]. Эта структура представляет собой полиэтиленовый цилиндр, в котором имеется 3 продольных отверстия (Рис. 3). В крайние отверстия вставляются металлические проволоки, а среднее остается пустым. В нем и концентрируется электромагнитное поле основной моды. Поперечные размеры волновода должны быть много меньше длины волны. Возможна

также конструкция с тремя проводниками. Постоянная затухания в такой ЛП меняется от $0,1 \text{ см}^{-1}$ на частоте $0,25 \text{ ТГц}$ до $0,4 \text{ см}^{-1}$ на частоте 2 ТГц . Ценным качеством этой ЛП является возможность изгибов.

Для возбуждения обоих типов ЛП используются Гауссовы пучки, создаваемые источником колебаний и проходящие через вакуумные окна приборов.

3. Резонаторные системы

Во многих вакуумных приборах микроволнового диапазона (например, в клистронах) в качестве электродинамической системы используются тороидальные объемные резонаторы. При повышении рабочей частоты размеры резонаторов уменьшаются, их добротность, волновое сопротивление и допустимое напряжение на зазоре падают до недопустимых значений. Диаметр пролетного канала также уменьшается, что требует увеличения плотности тока в электронном потоке. Поэтому в ТГц диапазоне необходимо использовать другие конструкции резонаторов.

Увеличение волнового сопротивления, определяемого формулой

$$\rho = \left| \int_L \mathbf{E} d\mathbf{l} \right|^2 / (\omega_0 W), \quad (1)$$

где интеграл берется по заданной линии, ω_0 – собственная частота рабочего вида колебаний резонатора, W – запасенная в нем энергия, возможно при использовании *многоззорных резонаторов*. Действительно, соединим вместе два одинаковых резонатора таким образом, чтобы электроны пролетали оба зазора в одной и той же фазе. В этом случае числитель в формуле (1) возрастет в 4 раза по сравнению с одноззорным резонатором, а запасенная энергия возрастет только в 2 раза. Таким образом, волновое сопротивление двухззорного резонатора возрастет в 2 раза. Если соединить N резонаторов, то волновое сопротивление увеличится в N раз. В действительности выигрыш будет меньше, так энергия запасается еще и в элементах связи между резонаторами, однако выигрыш получается все равно существенным.

Многоззорный резонатор можно представить как отрезок периодической структуры, условием резонанса в которой является равенство набега фазы волны при движении ее туда и обратно $\varphi = 2\pi n$, где n – целое число. Отсюда следует, что в N -ззорном резонаторе могут существовать $N/2+1$ резонансов, соответствующих одному и тому же виду колебаний в одноззорном резонаторе. В качестве рабочего обычно используется нулевой (2π) вид ($\varphi = 0$) или π -вид ($\varphi = \pi$). Важным параметром многоззорного резонатора является разделение частот видов колебаний, т. е. разность частот рабочего и ближайшего к нему по частоте паразитного вида. Разделение частот уменьшается с ростом числа зазоров и это ставит предел их увеличению. На практике число зазоров не превышает 6.

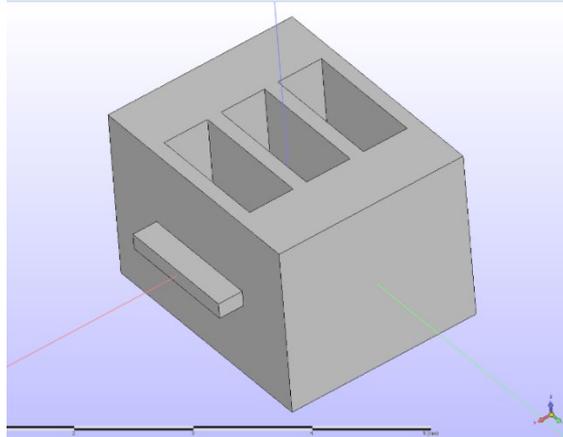


Рисунок 3. Четырехзазорный резонатор для ленточного электронного потока

При проектировании резонаторов ТГц диапазона возникает проблема пропуска через пролетный канал электронного потока. Радиус пролетного канала определяется, исходя из допустимой неравномерности распределения продольной составляющей электрического поля E_z по радиусу канала. Учитывая, что в бессеточном зазоре $E_z(r) = E_0 I_0(\gamma r)$, где $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка, а $\gamma = \sqrt{\beta_e^2 - k^2}$ – поперечная постоянная распространения, $\beta_e = \omega_0 / v_e$, $k = \omega_0 / c$, v_e, c – скорость электронов и скорость света, для получения приемлемой равномерности поля должно выполняться неравенство $\gamma a \leq 0.6$, где a – радиус пролетного канала или $a \leq 0.6 v_e / \omega_0$. Так, при ускоряющем напряжении 15 кВ и частоте $f_0 = 100$ МГц радиус пролетного канала не должен превышать 0,07 мм. Пропустить электронный поток с током порядка 1 А через такой канал невозможно, так как это потребовало бы очень большой плотности тока с катода.

Преодолеть эту трудность возможно при использовании ленточных электронных потоков, ширина которых может быть много больше их толщины. Это позволяет создавать сильноточные потоки, не прибегая к увеличению плотности тока с катода. На рис. 4 показана модель четырехзазорного резонатора для ленточного потока, разработанная для клистрона с частотой 95 ГГц.

4. Замедляющие системы

Аналогичные проблемы возникают и при проектировании замедляющих систем (ЗС) для ламп бегущей и обратной волны. Одно из возможных решений – использование ЗС типа «петляющий волновод» (Рис. 5).

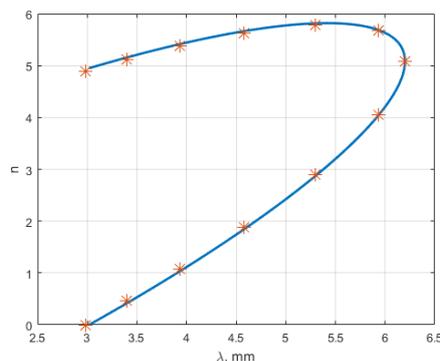


Рисунок 4. Дисперсионная характеристика петлящего волновода

Система состоит из изогнутого прямоугольного волновода с пролетным каналом для ленточного потока [5]. Такая ЗС может быть легко изготовлена с помощью электроэрозионной технологии или технологий LIGA или DRIE. В первом приближении можно считать, что вдоль изогнутого волновода распространяется волна типа H_{10} в прямоугольном волноводе. Соответственно, вдоль оси ЗС эта волна распространяется медленнее.

На рис. 6 показана дисперсионная характеристика петляющего волновода для нулевой и минус первой пространственных гармоник.

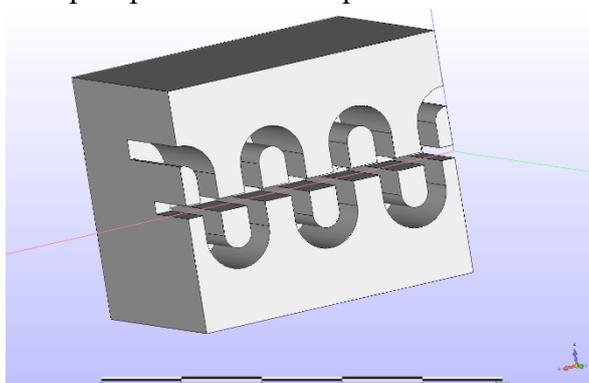


Рисунок 5. ЗС типа «петляющий волновод» с ленточным электронным потоком

Как видно, дисперсия ЗС на минус первой гармонике незначительна и ее можно использовать для создания широкополосных ЛБВ. Сопротивление связи этой ЗС на рабочей пространственной гармонике находится в пределах от 10 до 100 Ом. ЗС типа «петляющий волновод» используется в ряде ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Так, компания Northon Grumman испытала ЛБВ на петляющем волноводе на частоту 850 МГц. Выходная мощность лампы составила 100 мВт.

Список литературы

1. Markov A, Mazhorova A., Skorobogatiy M. Planar Porous THz Waveguides for Low-Loss Guiding and Sensing Applications // IEEE Trans. On Terahertz science and technology. V. 3, No 1, pp. 96-102, 2013.
2. Makov A., Gorgutsa S, Skorobogatiy S. Practical metal-wire THz waveguides. [arXiv:1206.2984](https://arxiv.org/abs/1206.2984) [physics.optics. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1206.298>], 2012.
3. Mbonye M., Mendis R., and Mittleman D., “A terahertz two-wire waveguide with low bending loss,” Applied Physics Letters, 95, 233506 (2009).
4. Григорьев А. Д. Терагерцевая электроника. М.: Физматлит, 2020, 308 с.
5. Marlk F. The analytical design of a folded waveguide travelling wave tube and a small signal gain analysis using Madey’s theorem. PIER, 2009, pp/ 137-162.
6. Vishnu S. Design of a 0.22 THz, 100 W planar TWT for ultrawide band wireless communications //COJ Electronics & Communications, 2018, V. 1, No 1, pp 137-162.