

Диэлектрический волновод с периодическими неоднородностями как средство для измерения характеристик диэлектриков

А.Р. Насыбуллин, Т.М. Ишкаев, Д.Е. Шаронов

Казанский национальный Исследовательский Технический Университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева), Казань

Аннотация: В данной статье рассматриваются различные варианты конфигураций диэлектрических неоднородных волноводов в СВЧ диапазоне, рассмотрены результаты компьютерного электродинамического моделирования предложенных конфигураций структур с периодическими неоднородностями. При проведении моделирования варьировались геометрические и электрофизические параметры периодической структуры с целью выявления их влияния на характеристики предлагаемого датчика для определения свойств жидких диэлектрических сред.

Ключевые слова: диэлектрический волновод, брэгговское отражение, диэлектрическая проницаемость, коэффициент отражения.

Для радиоэлектроники последние годы характерно изучение и техническое освоение миллиметрового, субмиллиметрового и светового диапазонов электромагнитных волн. Очевидно, что изучение и освоение новых диапазонов невозможно без создания элементной базы, основу которой составляют волноводные, резонансные и неоднородные структуры. СВЧ и КВЧ устройства, которыми можно обобщить определением структуры с периодическими неоднородностями, широко известны в теории и технике направляющих, передающих и излучающих систем и комплексов. Такие устройства, принцип действия которых основан на резонансном взаимодействии прямых и многократно отраженных от неоднородностей электромагнитных волн, нашли свое применение при создании фильтрующих схем, формирователей и преобразователей радиочастотных сигналов. В качестве направляющей системы часто используют различные волноводные структуры, в частности диэлектрические. Линию передачи, выполненную из диэлектрической пластины, стержня или трубки, принято называть диэлектрическим волноводом [1].

Диэлектрические волноводы, широко используются в технике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Исключительное применение они нашли в радио оптическом диапазоне [2,3]. Для диэлектрического волновода с неоднородностями существует несколько возможных вариантов использования в технике, например, в качестве фильтров, антенн, резонаторов и др.

Активно используемое в передающих сетях оптическое волокно является диэлектрическим волноводом оптического диапазона. Благодаря его использованию в нашей жизни появился высокоскоростной интернет, а также высокоточные измерительные устройства на основе волоконных решеток Брэгга (ВРБ). В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах диэлектрические волноводы, как линия передачи не проявила себя так же хорошо, как это сделало оптическое волокно. Поэтому сейчас почти невозможно встретить диэлектрическую линию передачи миллиметрового диапазона длин волн [3]. Несмотря на непрактичность использования в качестве линий передачи, диэлектрические волноводы в последнее время начали широко использоваться в сенсорном направлении. Свое применение такие системы нашли в биосенсорах, измерении толщины различных слоев материалов, мониторинге линий передач и т.д.

Методы измерения различных показателей основываются на характеристических коэффициентах рассеяния S_{11} (коэффициент отражения) и S_{12} (коэффициент передачи). Периодические неоднородности в диэлектрическом волноводе создают брэгговский резонанс, от изменения вида, их геометрических размеров, места расположения, материала, заполняющего неоднородности, изменяется форма резонанса. Благодаря таким изменениям можно сделать выводы о характере изменения среды.

Исследования, которые проводятся в области диэлектрических волноводов с периодическими неоднородностями, охватывают в первую

очередь волноводы цилиндрической формы. Возбуждение цилиндрических волноводов возможно за счет круглых металлических волноводов, а согласование производится с помощью перехода в виде конуса [4]. Подобный волновод был смоделирован в программе электрофизического моделирования CST Microwave studio. Внешний вид компьютерной модели показан на рис. 1.

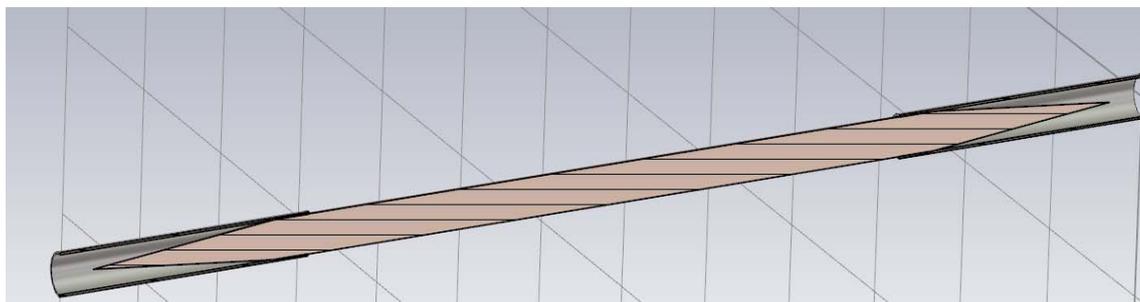


Рис. 1. Диэлектрический волновод с устройствами возбуждения (вид в разрезе).

При внесении в такой волновод периодической системы неоднородностей в виде полых цилиндрических ячеек, проявляется резонанс в области брэгговской длины волны. Изменение формы неоднородностей периодической структуры, позволяют изменять форму резонанса [5, 6]. На рис. 2 в качестве примеров изображены коэффициенты отражения для различных видов неоднородностей, а также зависимость изменения резонанса от материала заполнения ячеек. На рис. 2а изображена характеристика диэлектрического волновода с внесенной периодической структурой Брэгга. На рис. 2б изображена зависимость изменения формы резонанса от поляризации излучающего порта. На рис. 2в изображена зависимость изменения коэффициента отражения от изменения глубины проникновения неоднородности конической формы в диэлектрический волновод. На рис. 2г изображена зависимость изменения коэффициента

отражения от вариации диэлектрической проницаемости среды, заполняющей ячейки периодической структуры.

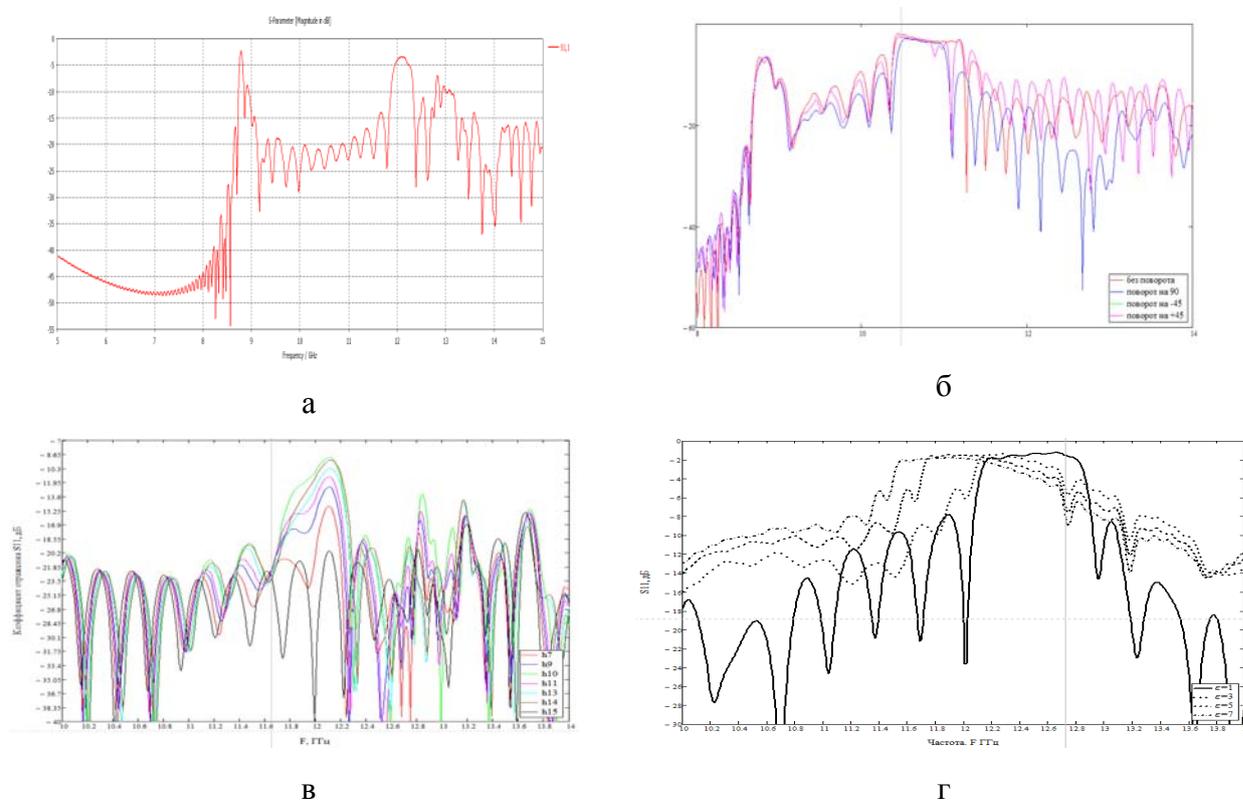


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения диэлектрического волновода с периодическими неоднородностями от изменения геометрии и расположения неоднородности. А - коэффициент отражения диэлектрического волновода с периодическими неоднородностями цилиндрической формы. Б – зависимость коэффициента отражения диэлектрического волновода с периодическими неоднородностями от расположения неоднородностей (повороты на: 0°, 90°, +45°, -45°) В - коэффициент отражения диэлектрического волновода с периодическими неоднородностями конической формы. Г- зависимость коэффициента отражения диэлектрического волновода с периодическими неоднородностями от диэлектрической проницаемости материала, заполняющего ячейки.

Представленные данные на рис. 2 дают понять, что данный тип структуры можно использовать для измерения диэлектрической проницаемости различных материалов [7]. Наиболее удачное применение

такой вид диэлектрических волноводов найдет в измерении диэлектрической проницаемости жидких сред из-за простоты введения их в ячейки сенсора.

Для улучшения чувствительности определения диэлектрических свойств, было принято решение внедрить в центр периодической структуры фазовый сдвиг в виде участка с расстоянием между ячейками в половину периода. Результатом такого изменения периодической системы стало появление узкого резонанса в коэффициенте отражения. Модель подобной структуры представлена на рис. 3.

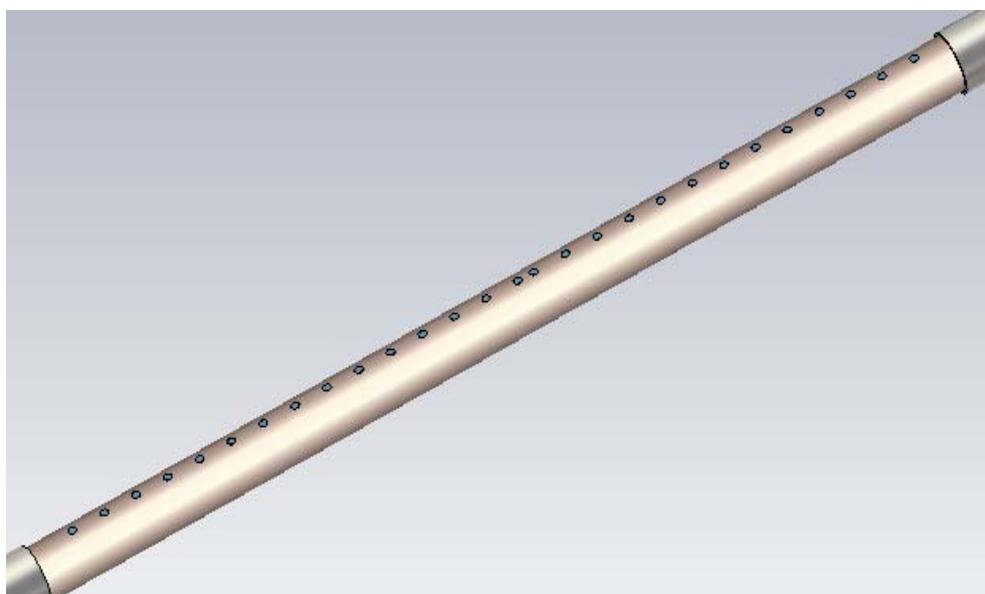


Рис. 3. Модель диэлектрического волновода с фазовым сдвигом.

Коэффициент отражения диэлектрического волновода с периодическими неоднородностями и фазовым сдвигом изображен на рис. 4.

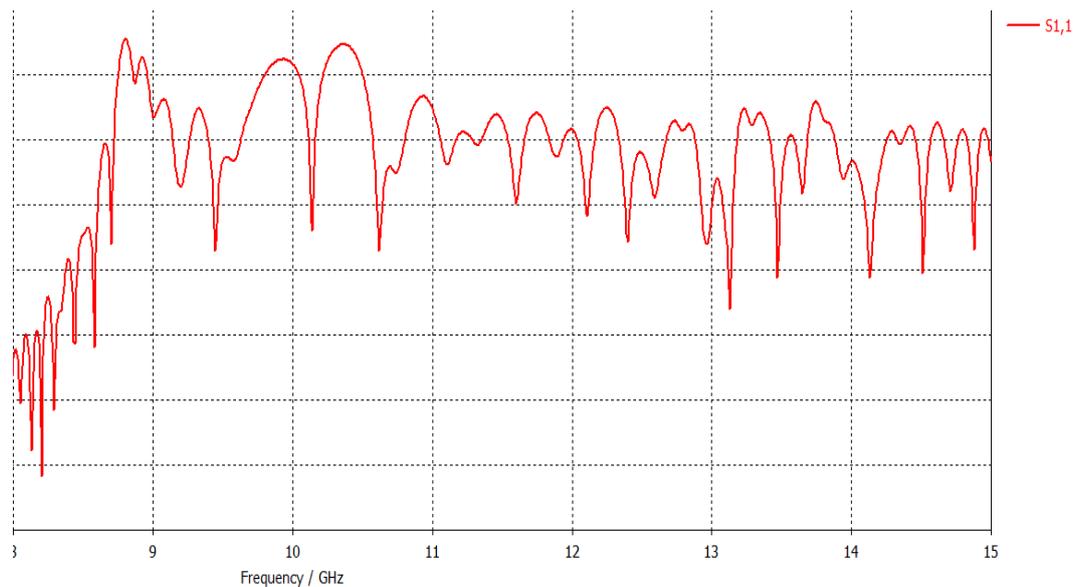


Рис. 4. Коэффициент отражения диэлектрического волновода с фазовым сдвигом.

Вывод: В данной статье приведен сравнительный анализ вариантов реализации диэлектрических неоднородных волноводов в СВЧ диапазоне, рассмотрены результаты компьютерного электродинамического моделирования предложенных конфигураций структур. При проведении моделирования варьировались геометрические и электрофизические параметры периодической структуры в диэлектрическом волноводе с целью выявления их влияния на метрологические характеристики датчика. Так же был рассмотрен вариант неоднородного диэлектрического волновода с внесенным в него фазовым сдвигом для улучшения чувствительности датчиков на его основе.

Литература

1. Севастьянов А.А. Брэгговские СВЧ-структуры в коаксиальном кабеле для систем контроля уровня жидких сред: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук - Самара, 2014. – 175с.
2. Петров Б.Н. Электродинамика и распространение радиоволн. - М: Радио и связь, 2000. – 320с.

3. Joao Crisdstomo, Weyl Albuquerque Costa, and Auflio Jose Giarola Analysis of the Selective Behavior of Multilayer Structures with a Dielectric Grating // IEEE Transactions on antennas and propagation. 1995. Vol.43 No. 5. pp. 47-56.

4. Насыбуллин А.Р., Ишкаев Т.М. СВЧ диэлектрический волновод круглого сечения с брэгговскими периодическими неоднородностями // Инженерный вестник Дона 2017. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4232

5. Калинин В. А., Лобов Г. Д., Штыков В. В. Радиофизика для инженеров / Под ред. С.И.Баскакова. — VI.: Изд-во МЭИ, 1994. — 130 с.

6. Насыбуллин А.Р. Пассивные оптические и коаксиальные СВЧ структуры с периодическими неоднородностями: трансфер сенсорных технологий // Инженерный вестник Дона. 2016. №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3761

7. Ишкаев Т.М. Периодические брэгговские структуры в цилиндрическом волноводе СВЧ диапазона. Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы-2017», Казань, с.34-39

8. V. Giurgiutiu and J. Bao. Embedded-ultrasonics structural radar for in situ structural health monitoring of thin-wall structures // Structural Health Monitoring, vol. 3, pp.121-140, 2004.

9. Songping Wu, Tao Wei, Jie Huang, Hai Xiao, Jun Fan. A Study on QFactor of CCBG Sensors by Coupled Mode Theory. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, edited by Masayoshi Tomizuka, Chung-Bang Yun, Jerome P. Lynch, Proc. of SPIE, p. 59, 2012.

10. Васильев С.А., Медведков О. И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применения. Квантовая электроника, 2005, т.35, №12, с. 1085-1103.

References

1. Sevast'yanov A.A. Breggovskie SVCh-struktury v koaksial'nom kabele dlya sistem kontrolya urovnya zhidkikh sred: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Bragg microwave structures in a coaxial cable for liquid level monitoring systems]. Samara, 2014. p.175.
2. Petrov B.N. Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln. [Electrodynamics and propagation of radio waves]. M: Radio i svyaz', 2000. p. 320.
4. Nasybullin A.R., Ishkaev T.M Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4232
5. Kalinin V. A., Lobov G. D., SHtykov V. V. Radiofizika dlya inzhenerov [Radiophysics for engineers]. Pod red. S.I.Baskakova. VI.: Izd-vo MEHI, 1994. p. 130.
6. Nasybullin A.R. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3761
7. Ishkaev T.M. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Prikladnaya elektrodinamika, fotonika i zhivye sistemy-2017», Kazan 2017, pp. 34-39.
10. Vasil'ev S.A., Medvedkov O. I., Korolev I.G., Bozhkov A.S., Kurkov A.S., Dianov E.M. Kvantovaya elektronika, 2005, t.35, №12, pp.1085-1103.