

11.1

Щелевой переход с гар-волновода на симметричную полосковую линию передачи в миллиметровом диапазоне длин волн

© А.Д. Полигина^{1,2}, А.В. Таганов²¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия² АО „Научно-производственное предприятие „Радиосвязь“, Красноярск, Россия

E-mail: anastasia0711@mail.ru

Поступило в Редакцию 21 июля 2022 г.

В окончательной редакции 18 августа 2022 г.

Принято к публикации 19 августа 2022 г.

Проведено исследование возможной реализации перехода с волноводной линии передачи на полосковую в миллиметровом диапазоне длин волн. Разработана структура щелевого перехода с гар-волновода (волновода с зазором) на полосковую линию передачи. Определены рабочие размеры конструктивных частей перехода для применения в составе систем возбуждения антенн в миллиметровом диапазоне. Выполнено моделирование полученной структуры, сделаны выводы о ее применимости в системах связи.

Ключевые слова: гар-волновод, излучающая щель, полосковая линия передачи.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.19.53591.19319

Постоянное ужесточение требований к пропускной способности радиоканалов мотивирует на освоение и работу во все более высокочастотных диапазонах, в том числе в миллиметровом диапазоне длин волн.

Классические прямоугольные волноводы в связи с малыми потерями являются наиболее предпочтительной линией передачи в данном диапазоне длин волн. Зачастую они изготавливаются в виде разъемной конструкции, что приводит к ухудшению электрического контакта в местах соединения. В миллиметровом диапазоне длин волн низкая точность сборки приводит к сильному искажению электрических характеристик. Для решения данной проблемы учеными был предложен новый вид линии передачи, известный как гар-волновод, который имеет более гибкие возможности в модульной сборке [1,2]. Основное достоинство таких волноводов состоит в том, что они могут быть реализованы без прямого контакта между верхней и нижней стенками [3]. Данное преимущество позволяет создавать недорогие и эффективные конструкции в миллиметровом диапазоне длин волн. Такая технология дает возможность снижать требования к точности и времени изготовления, использовать менее дорогостоящие технологии производства.

Гар-волновод представляет собой две параллельные металлические пластины. За счет периодической структуры, расположенной на одной из них (рис. 1, а), образуется полоса задерживания для ограничения распространения плоскопараллельных мод и поверхностных волн в нежелательных направлениях. Если расположить периодическую структуру на расстоянии меньше $\lambda/4$ от гладкой поверхности, то конструкция начинает работать как поверхность с высоким импедансом, создавая тем самым полосу заграждения в некоем частотном диапазоне. Ширина этой полосы увеличивается при уменьшении

высоты воздушного зазора g [4]. При периоде гребня $d > \lambda/4$ верхний предел полосы заграждения уменьшается из-за распространения высших мод.

Периодическая структура может иметь различную форму: гребенчатую с прямоугольными (круглыми) штырями [5], грибовидную [6], в форме спиралей [7] и др. В исследовании было подобрано оптимальное количество гребенчатых рядов периодической структуры, обеспечивающих заграждение на необходимом уровне. Так, для размера канала гар-волновода $a \times b$ были получены кривые S -параметров, представленные на рис. 1, b , из которых можно сделать вывод, что коэффициент S_{11} не превышает -20 dB, коэффициенты S_{31} и S_{41} не превосходят -55 dB в исследуемой полосе частот без учета потерь в металле. Это связано с минимальным уровнем коэффициента отражения и высоким уровнем развязки между двумя каналами.

Переходы между гар-волноводами и другими линиями передачи играют важную роль при проектировании СВЧ-устройств. Известен переход с гар-волновода на микрополосковую линию за счет возбуждения в обеих структурах квази-ТЕМ-моды [8].

Для улучшения согласования на границе раздела двух сред остается выполнить требование по преобразованию электрического поля, распространяющегося в диэлектрике подложки, в электрическое поле волновода. Этого можно добиться сужением канала, переходя от классического гар-волновода к П-образному [9], что и было использовано в данной работе. Известен метод преобразования ТЕМ-моды, распространяющейся в микрополосковой линии, в моду H_{10} волновода за счет щелевой линии [10]. Однако целью исследования являлась разработка конструкции перехода с гар-волновода на симметричную полосковую линию передачи для дальнейшего осуществления систем возбуждения антенных решеток.

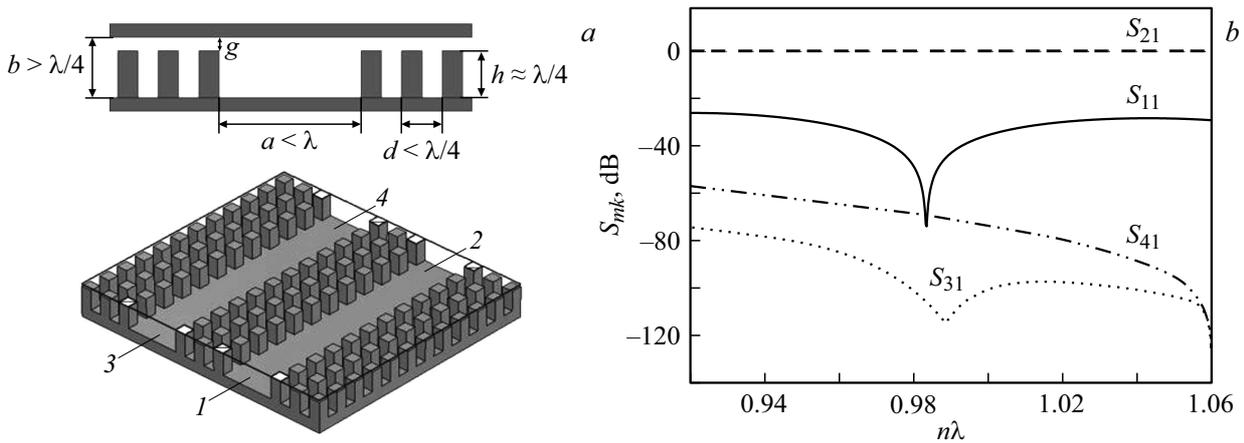


Рис. 1. *a* — структура гребенчатого гар-волновода. 1–4 — номера портов. *b* — частотная зависимость *S*-параметров исследуемой модели.

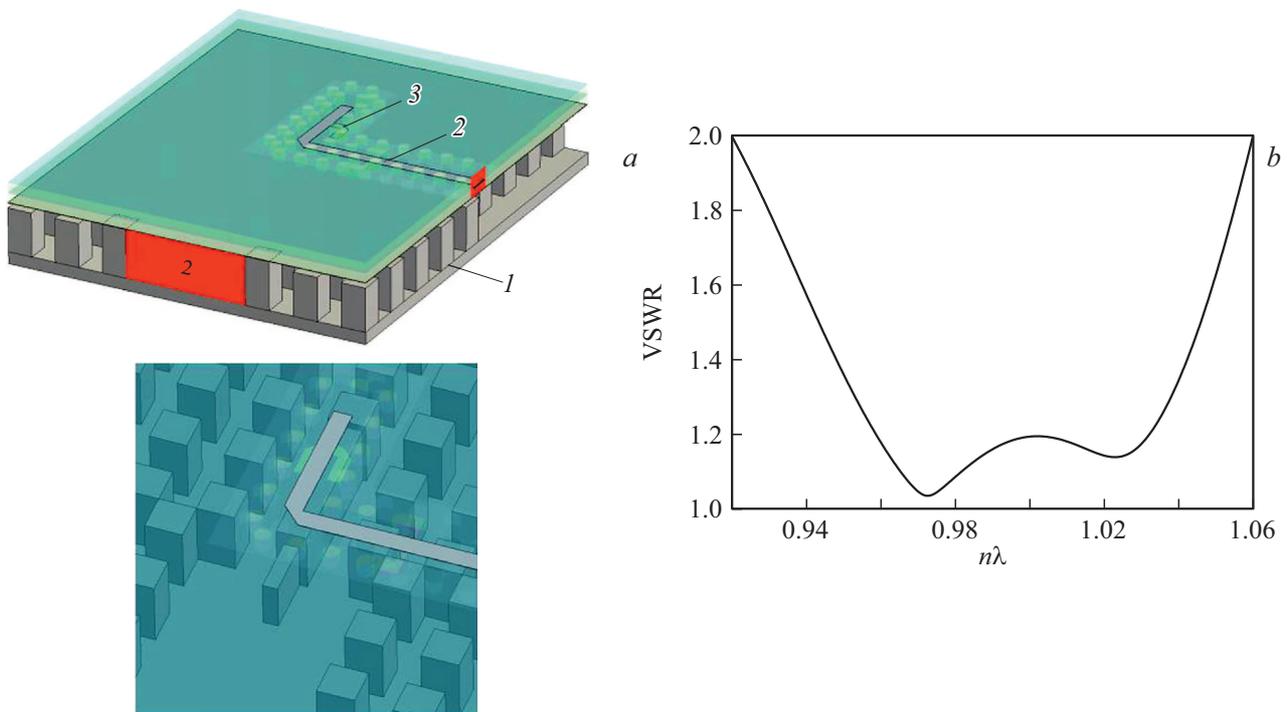


Рис. 2. *a* — структура перехода с гар-волновода на полосковую линию. 1 — гар-волновод, 2 — полосковая линия передачи, 3 — излучающая полуволновая щель. *b* — частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению (VSWR) исследуемой модели.

На основе изложенного выше был реализован вариант преобразования моды волны, распространяющейся в гар-волноводе, в моду полосковой линии передачи через излучающую щель, прорезанную в верхней гладкой стенке гар-волновода, одновременно являющейся слоем металлизации печатной платы, содержащей симметричную полосковую линию (рис. 2, *a*). Длина щели была выбрана около половины длины волны, что обеспечивало работу на частоте первого резонанса. В таком случае для гар-волновода она будет являться чисто активной нагрузкой. Конструкция симметричной платы была реализована

на материале Isola Astra MT77 толщиной 0.254 mm с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3$.

В исследовании полосковая линия передачи экранирована металлизированными отверстиями во избежание распространения электромагнитной волны по диэлектрику. Полученная структура многослойной печатной платы представляет собой своего рода SIW-волновод (substrate integrated waveguide — интегрированный в подложку волновод) [11]. Для устранения возбуждения высших мод ширина образованного металлизированными отверстиями волновода не должна превышать

определенную длину. Исходя из этого и для обеспечения компактности реализована излучающая щель U -образной формы. Согласование структуры реализовано с использованием волноводного четвертьволнового трансформатора в гар-волноводе с сужением канала посредством перехода на Π -образный волновод. Полученная структура оптимизирована по критерию минимального коэффициента стоячей волны по напряжению (рис. 2, *b*). Можно сделать вывод о высоком уровне согласования полученного перехода в необходимом диапазоне частот.

Таким образом, исследования показывают, что имеется возможность создания эффективного перехода с гар-волновода на полосковую линию передачи. Данная структура позволит создавать системы возбуждения антенных решеток в миллиметровом диапазоне длин волн с низкими потерями и интеграцией полосковой системы в верхнюю внешнюю стенку гар-волновода. Отсутствие требований к электрическому контакту стенок гар-волноводов позволяет эффективно использовать их в массовом производстве.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-47-240003.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Sievenpiper, L. Zhang, R.F.J. Broas, N.G. Alexopolous, E. Yablonovitch, *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, **47** (11), 2059 (1999). DOI: 10.1109/22.798001
- [2] F. Yang, Y. Rahmat-Samii, *Electromagnetic band gap structures in antenna engineering* (Cambridge University Press, 2009).
- [3] P.-S. Kildal, E. Alfonso, A. Valero-Nogueira, E. Rajo-Iglesias, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, **8**, 84 (2009). DOI: 10.1109/LAWP.2008.2011147
- [4] E. Rajo-Iglesias, P.-S. Kildal, *IET Microwaves Antennas Propag.*, **5** (3), 282 (2011). DOI: 10.1049/iet-map.2010.0073
- [5] A.U. Zaman, M. Alexanderson, T. Vukusic, P.-S. Kildal, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, **4** (1), 16 (2014). DOI: 10.1109/TCPMT.2013.2271651
- [6] S.A. Razavi, P.-S. Kildal, L. Xiang, E. Alfonso Alós, H. Chen, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **62** (9), 4564 (2014). DOI: 10.1109/TAP.2014.2331993
- [7] E. Rajo-Iglesias, P.-S. Kildal, A.U. Zaman, A. Kishk, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, **2** (10), 1623 (2012). DOI: 10.1109/TCPMT.2012.2207957
- [8] Y. Zhang, J.A. Ruiz-Cruz, K.A. Zaki, A.J. Piloto, *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, **20** (9), 480 (2010). DOI: 10.1109/LMWC.2010.2056358
- [9] A.U. Zaman, T. Vukusic, M. Alexanderson, P.S. Kildal, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, **12**, 1558 (2013). DOI: 10.1109/LAWP.2013.2293151
- [10] D. Zarifi, A. Ashrafian, in *2020 14th Eur. Conf. on antennas and propagation (EuCAP)* (IEEE, 2020), p. 1. DOI: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135460
- [11] T. Djerafi, K. Wu, *J. Univ. Electron. Sci. Technol. China*, **42** (2), 171 (2013). DOI: 10.3969/j.issn.1001-0548.2013.02.002