DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.10.17

УДК: 621.372.85

Дефектная мода в одномерной полимерной фотонной структуре, находящейся внутри волновода СВЧ-диапазона

В.С. Деллалов[1], Ю.И. Непочатых[1], Я.С. Соколовский[1], В.В. Науменко[1,2], Е.А. Пилипенко[1], И.Л. Любчанский[1,2]

[1]Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина, Россия, Донецк

[2]Донецкий государственный университет, физико-технический факультет, Россия, Донецк

Статья поступила в редакцию 15 октября 2026 г.

Аннотация. В работе экспериментально изучено поведение дефектной моды одномерного полимерного фотонного кристалла, помещенного в СВЧ-волновод, в зависимости от структуры дефектной ячейки. Исследуемый фотонный кристалл представлял собой прямоугольный параллелепипед, содержащий сквозные отверстия прямоугольного сечения, которые были периодически расположены вдоль его главной оси. Образцы изготовлялись из полимерного материала методом 3D-печати. Геометрические параметры этого фотонного кристалла были подобраны таким образом, чтобы фотонная запрещенная зона формировалась в диапазоне частот от 12 до 17 ГГц. Дефектная ячейка создавалась путем частичного заполнения одного из отверстий, что обеспечивало наличие воздушного зазора регулируемого размера. Измерена зависимость положения дефектной моды внутри запрещенной фотонной зоны от размера этого воздушного зазора и проведена теоретическая оценка наблюдаемого эффекта.

Ключевые слова: одномерный полимерный фотонный кристалл, дефектная мода, СВЧ-волновод, 3D-печать.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания федерального государственного бюджетного научного учреждения «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина».

Автор для переписки: Любчанский Игорь Леонидович, igorl@donfti.ru,

Введение

Фотонные кристаллы (ФК) представляют собой одно-, двух- и трехмерные периодические структуры, периоды которых сравнимы с длиной волны электромагнитного излучения, распространяющегося в такой среде [1]. Главной особенностью ФК является наличие фотонных запрещенных зон (ФЗЗ) – интервалов частот (или длин волн), в пределах которых распространение электромагнитных волн (ЭМВ) невозможно [1]. При внесении дефекта (например, дополнительного элемента) в такую периодическую структуру внутри ФЗЗ возникают узкие пики в коэффициенте пропускания или провалы в коэффициенте отражения, которые характеризуют так называемые дефектные моды (ДМ) [1]. Подобные спектральные особенности проявляются в ФК для широкого диапазона частот ЭМВ: от оптического до микроволнового (или радиочастотного) [1]. Отдельный интерес представляет изучение ФК в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне [2], поскольку СВЧ-ФК широко применяются в качестве основы элементной базы ряда приборов и устройств СВЧ-фотоники [2-5]. Следует отметить, что при создании фотонных структур для этого диапазона, наряду с традиционными материалами (кристаллическими и аморфными твердыми телами), возможно использование полимеров и методов 3D-печати для их получения [6, 7]. В недавних работах [7, 8] сообщалось о наблюдении ФЗЗ и ДМ в полимерных СВЧ-ФК. Так, в [7] представлены результаты изготовления методом 3D-печати одномерного ФК из полиэтилентерефталатгликоля (polyethylene terephthalate glycol – PETG). Конструкция представляла собой прямоугольную пластину с поперечным сечением 23×10 мм^2 с четырьмя

прямоугольными сквозными отверстиями размером 5×18 мм^2. В центре пластины располагался дефект в виде поворотного цилиндра, содержащего пару тонких металлических стержней диаметром 2 мм. При помещении такого ФК в волновод прямоугольного сечения в его спектрах отражения наблюдалась ДМ. В зависимости от ориентации этих стержней (вдоль или поперек волновода) оказалось возможным перестраивать положение ДМ в спектре пропускания ФК в интервале частот от 7,8 до 9,4 ГГц. В недавней работе [8] приведены результаты наблюдения ДМ в одномерном полимерном ФК со структурой $(AB)_4C(AB)_4$, где A – слой воздуха толщиной 6 мм, а B – слой полимерного композита Rogers 4000C толщиной 1,524 мм. Дефектный слой C также образован воздушным зазором, толщина которого менялась от 4 до 8 мм. Измерения, описанные в статье [8], проводились в безэховой камере с помощью векторного анализатора сетей (VNA – vector network analyzer).

В настоящей работе изложены результаты нашего исследования положения ДМ в одномерном ФК, полученном методом 3D-печати и помещенном в СВЧ-волновод, в зависимости от структуры дефектного слоя. В отличие от работ [6, 7], нами исследована структура, в которой геометрический размер каждой элементарной ячейки ФК одинаков, однако в одной из них варьируются размеры составляющих ее слоев, что превращает эту ячейку в дефект. В первом разделе статьи изложены процедура получения ФК с помощью 3D-печати и характеристики изготовленных образцов. Во втором разделе статьи описана экспериментальная установка и приведены результаты измерений, а также теоретическая оценка поведения ДМ в таких ФК, содержащих дефекты с различной структурой. В заключении проведено обсуждение полученных результатов.

1. Изготовление образцов

Образцы волноводных ФК изготавливались методом послойного наплавления (Fused Deposition Modeling – FDM) с использованием 3D-принтера Flying Bear S1. В качестве материала для печати использовалась нить из PETG

(филамент) компании Bestfilament диаметром 1,75 мм. Подготовка управляющих файлов выполнялась в программном обеспечении OrcaSlicer.

Печать осуществлялась через сопло диаметром 0,4 мм при высоте слоя 0,2 мм. Температуры экструдера и нагревательной платформы равнялась 235 °C, и 80 °C, соответственно, а скорость печати была 100 мм/с. Плотность заполнения образцов составляла 100 %. Поддерживающие структуры не использовались.

При печати прямоугольные образцы ориентировали на рабочем столе 3D-принтера широкой продольной гранью вниз, при этом сквозные отверстия периодической структуры были направлены вдоль оси послойного построения. Такая ориентация позволяла формировать внутреннюю геометрию отверстий без применения поддерживающих структур.

Образцы, изготовленные по описанной выше технологии, представляли собой параллелепипеды с размерами 7,8×15,8×120 мм^3, содержащие сквозные отверстия прямоугольного поперечного сечения 6×11 мм^2 (см. рис. 1). Была выбрана оптимальная структура, содержащая семь отверстий, поскольку дальнейшее увеличение их числа практически не влияло на характеристики отраженного сигнала. Номинальное поперечное сечение изготовленного полимерного ФК составляло около 15,8×7,8 мм^2. Фактическое внутреннее сечение используемого СВЧ-волновода WR-62 составляло около 16,00×8,00 мм^2. После печати производилось удаление технологических заусенцев, препятствующих свободной установке образца в волновод. Дополнительная механическая обработка внутренних поверхностей отверстий не выполнялась. Дефект структуры формировался путем заполнения одного из отверстий материалом, из которого были изготовлены образцы. Это приводило к появлению на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) глубокого провала, соответствующего ДМ внутри ФЗЗ. Наиболее выражено ДМ проявлялись при расположении дефектной ячейки в третьем отверстии слева (при падении СВЧ-сигнала на образец слева). Глубина провала в этом случае достигала 23 дБ относительно максимального уровня отраженной мощности. Было изготовлено пять образцов: один из них не содержал дефектную ячейку (структура А); три

образца с дефектной ячейкой, которая была частично заполнена материалом основной матрицы с различной толщиной и соответствующими воздушными прослойками в 2 мм, 3 мм и 4 мм, соответственно (структуры B, C и D); один образец с полностью заполненным отверстием (структура E), см. рис. 1 и рис. 2.



Рис. 1. Фотографии изготовленных полимерных ФК, описанные выше.

На рис. 2 изображены образцы с указанием степени заполнения дефектного отверстия в соответствии с фотографиями образцов, представленных на рис. 1.

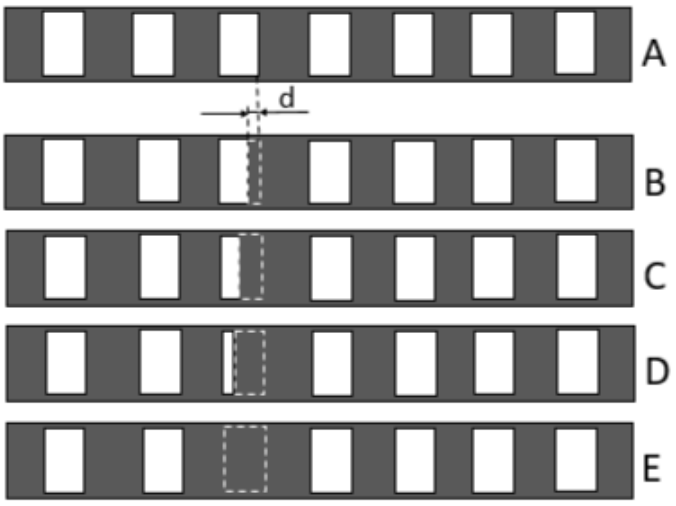

Рис. 2. Схематическое изображение полимерных ФК, описанные выше.

При 3D-печати задавались следующие размеры периодической структуры вдоль продольной оси: а) 5,60 мм для крайних сегментов ФК; б) 6,0 мм для отверстия и в) 11,0 мм для перемычки между соседними отверстиями.

Соответствующие номинальные значения полученных ФК равнялись 5,53 мм, 6,22 мм и 11,06 мм, соответственно.

2. Результаты эксперимента.

Экспериментальные исследования проводились с использованием панорамного измерителя коэффициента стоячей волны Р2-67. Образец помещался в волновод, практически полностью перекрывая его поперечное сечение, как показано на рис. 3. Измерения коэффициента отражения для TE_{01} – моды проводились в полосе частот от 12 до 17 ГГц. Запись уровня сигнала осуществлялась в режиме однократной развертки частоты с длительностью 40 секунд и ручным запуском.

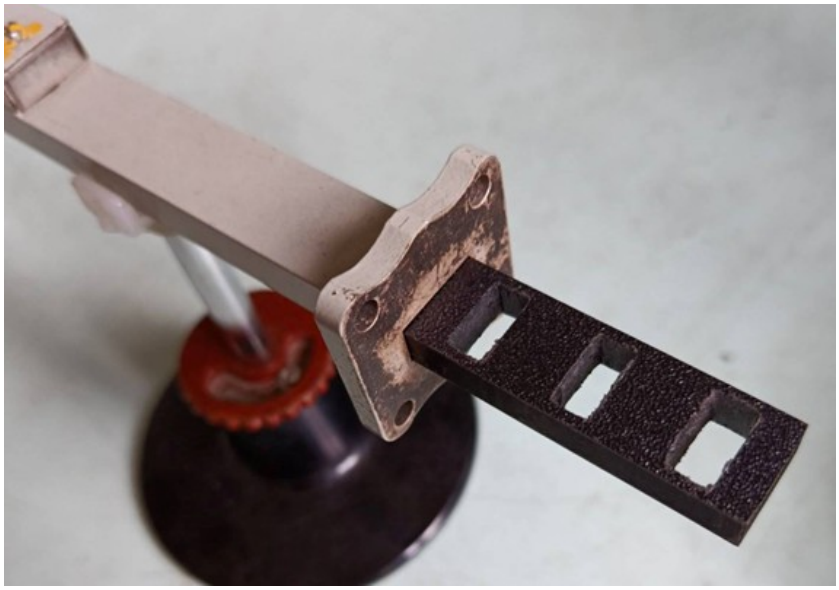

Рис. 3. Волновод с частично вставленным образцом.

АЧХ сигнала, отраженного от такой структуры, представляла собой плато в диапазоне частот от 12,5 до 15,2 ГГц, т.е. ФЗЗ, соответствующей высокому уровню отраженной СВЧ-мощности. Было исследовано влияние структуры дефектов на положение пиков, соответствующих ДМ, на изготовленных образцах (см. рис. 1 и рис. 2). Результаты соответствующих измерений показаны на рис. 4.

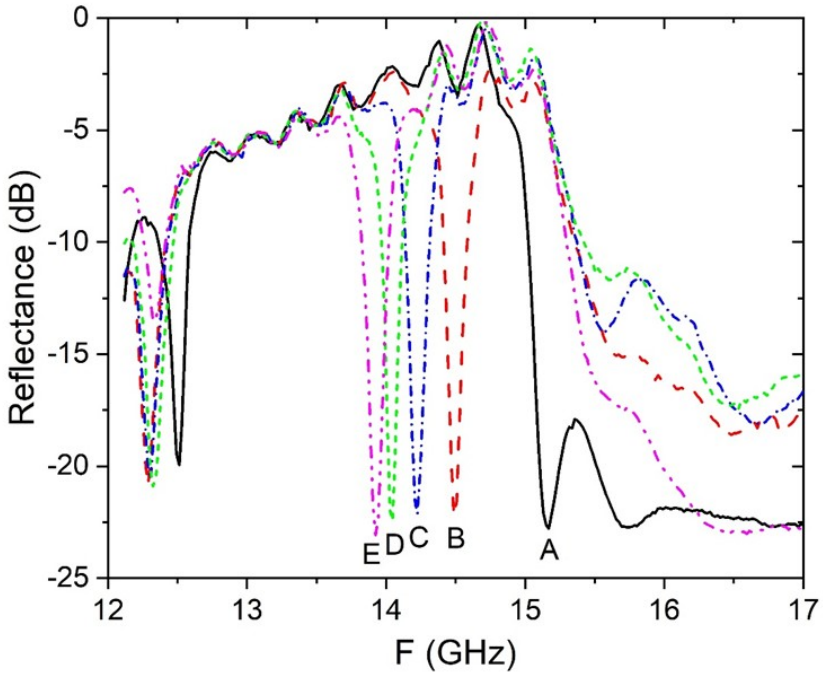

Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения для образцов с дефектными ячейками различной структуры, представленных на рис. 1 и рис. 2, помещенных в прямоугольный волновод.

Подобная задача была рассмотрена в рамках простой теоретической модели. А именно, отражение ЭМВ от помещенной в волновод слоистой структуры, образованной полимерными слоями и разделенными воздушными интервалами. Толщины полимерных слоев также, как и структура дефектной ячейки, соответствовали использованным в эксперименте образцам. Методом матрицы переноса, примененным к волноводной структуре [10], был рассчитан коэффициент отражения для TE_{01}-моды в ряде образцов: бездефектном и дефектных, соответствующих исследованным экспериментально. Значение диэлектрической проницаемости PETG для соответствующего диапазона было взято из статьи [9]. Результаты вычислений приведены на рис. 5.

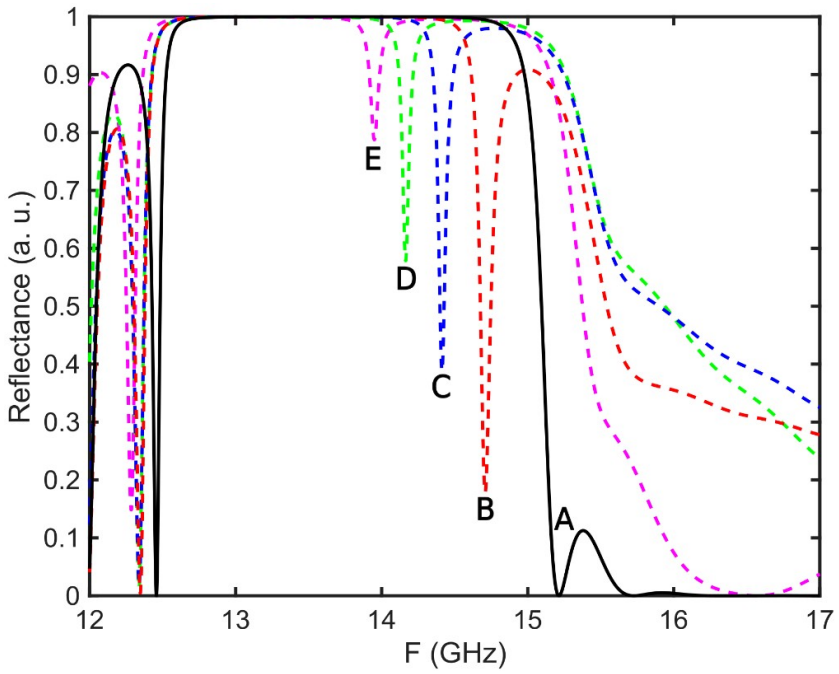

Рис. 5. Результаты численных расчетов ФЗЗ и поведения ДМ для TE_{01}-моды в структурах, представленных на рис. 1 и рис. 2, помещенных в прямоугольный волновод.

Из сопоставления результатов, представленных на рис. 4 и рис. 5 видно, что феноменологическая модель, основанная на методе матрицы переноса, качественно воспроизводит наблюдаемое поведение ДМ в зависимости от структуры дефектной ячейки. При этом, рассчитанные частоты ДМ для всех исследованных образцов отклоняются от экспериментальных значений незначительно (на проценты), тогда как расчетные интенсивности оказываются в 2-3 раза ниже измеренных. Такое расхождение, по-видимому, связано с тем, что используемая теоретическая модель ФК не полностью учитывает особенности реальных экспериментальных образцов. А именно, фактические отклонения размеров напечатанных элементов от номинальной геометрии, а также наличие небольшого воздушного зазора между образцом и внутренними стенками волновода могут быть возможной причиной расхождений между расчетными и экспериментальными частотными зависимостями S-параметров.

Заключение

В работе представлены результаты измерения параметров ДМ в одномерном полимерном ФК, помещенном в СВЧ-волновод. Исследована зависимость положения ДМ внутри ФЗЗ от степени заполнения дефектной ячейки. Показано, что при уменьшении воздушного зазора внутри дефектной ячейки ДМ сдвигается от высокочастотного края ФЗЗ к центру, а ее интенсивность незначительно (на несколько процентов) уменьшается. Численный анализ, проведенный в рамках феноменологической модели, основанной на методе матрицы переноса, качественно воспроизводит наблюдаемый частотный сдвиг ДМ в зависимости от структуры дефектной ячейки.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания федерального государственного бюджетного научного учреждения «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина».

Литература

1. Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton University Press (1995).
2. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2018 – 184 с. – ISBN 978-5-9221-1770-8.
3. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals. // Progress in Electromagnetic Research (PIER). – 2003. – P.185 – 209. https://doi.org/10.2528/PIER02010808.
4. Урик Винсент Дж.-мл., Мак-Кинни Джейсон Д., Вилльямс Кейт Дж. Основы микроволновой фотоники. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016 – 376 с. ISBN 978-5-94836-445-2.

5. Ouyang P.H., He S.R., Liu Y., Chai Y.Q., Ma J., He J.X., Wei L.F. Experimental microwave photonic crystals with controllable band gaps. // Phys. Rev. Appl. – 2025. – Vol. 23. No. 064036. DOI: https://doi.org/10.1103/pkkz-y5lp.
6. Михайлов А.И., Рябов Е.А., Сергеев С.А. Оценка возможностей 3D-печати для изготовления волноводных фотонных кристаллов. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2022. – Т. 25, №3. С. 29 – 35. https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.3.29-35.
7. Рябов Е.А., Андреев А.А., Сергеев С.А., Михайлов А.И. Управление амплитудно-частотной характеристикой узкополосного фильтра для X-диапазона частот на основе фотонного кристалла с подвижным цилиндрическим дефектом. // Russian Technological Journal. – 2025. – Т. 13, №3. С. 84 – 91. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-84-91.
8. Minyang Liu, Guang Lu, Bing Wang, and Hao Zhang. Highly directional microwave radiation modulated by 1D defect-mode photonic crystals. // Optical Materials Express. – 2026. Vol. 16, No.9. P. 3079 – 3087. https://doi.org/10.1364/OME.610941.
9. Азаров А.В., Политико А.А., Рожков С.С., Дьяконов В.А. Экспериментальные исследования электродинамических параметров PET-G филаментов для 3D-печати. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 7. С. 1 – 15. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.2.
10. Силин Р.А. Периодические волноводы. Москва: Фазис, 2002 – 438 с. – ISBN 5-7036-0073-1.

Для цитирования:

Деллалов В.С., Непочатых Ю.И., Соколовский Я.В., Науменко В.В., Пилипенко Е.А., Любчанский И.Л. Дефектная мода в одномерной полимерной фотонной структуре, находящейся внутри волновода СВЧ-диапазона // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 10. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.10.17