

09.4

Электрически перестраиваемый фотонный кристалл на основе копланарного волновода с наноразмерной сегнетоэлектрической пленкой

© В.М. Мухортов, С.И. Масычев, А.А. Маматов, Вас. М. Мухортов

Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону
E-mail: muhortov@rambler.ru

Поступило в Редакцию 1 марта 2013 г.

Исследован электрически перестраиваемый одномерный фотонный кристалл, созданный на основе копланарного волновода с периодической модуляцией волнового сопротивления. Для обеспечения электрической перестройки фотонного кристалла копланарный волновод сформирован на гетероструктуре $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ -оксид магния. Показана возможность управления амплитудно- и фазочастотными характеристиками исследованного устройства.

Структуры с фотонной запрещенной зоной (ФЗЗ), или фотонные кристаллы (ФК), вызывают большой интерес благодаря их уникальным характеристикам, а также возможности широкого применения в микроволновых цепях для улучшения диаграммы направленности антенн, увеличения выходной мощности усилителей, подавления высших гармоник в резонаторах, определения параметров материалов и т.д. [1–5].

В то же время недостатком реализованных в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне ФК являются их неприемлемо большие размеры [1]. Однако существует принципиальная возможность значительного уменьшения размеров СВЧ ФК за счет применения материалов с большой диэлектрической проницаемостью [6]. В этой связи особый интерес представляют тонкие сегнетоэлектрические пленки, диэлектрическая проницаемость которых способна достигать величин порядка нескольких тысяч [7,8]. При этом уникальными свойствами обладают пленки состава $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$, диэлектрическая проницаемость которых может

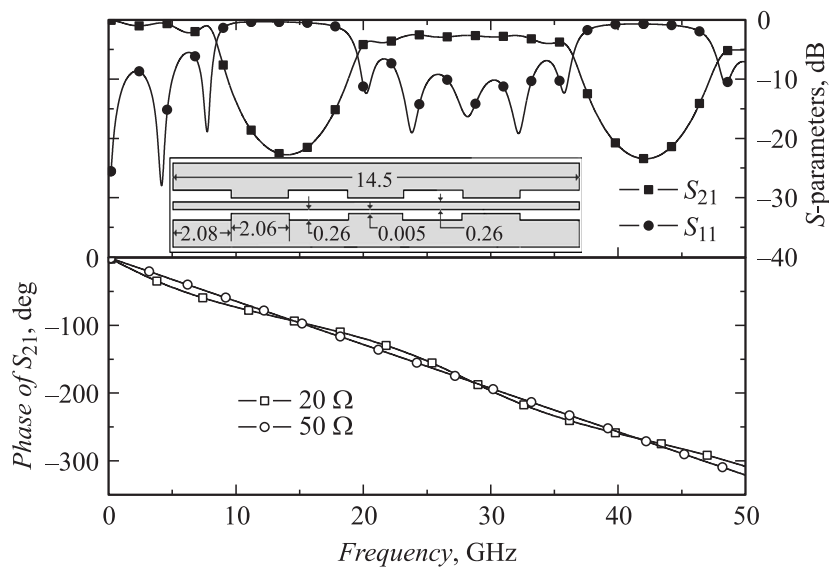


Рис. 1. Рассчитанные фазочастотные характеристики отрезков КПВ, образующих период ФК, и частотные зависимости модулей коэффициентов отражения S_{11} и передачи S_{21} ФК. На вставке: топология ФК.

изменяться более чем в 3 раза в случае приложения к ним напряжения смещения порядка 20 В [8].

Цель данной работы — показать, что введение в конструкцию ФК сегнетоэлектрической пленки $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ толщиной всего лишь 40 нм позволяет не только реально уменьшить физические размеры этого устройства, но и обеспечивает возможность электрической перестройки характеристик таких ФК.

Конструкция исследованного ФК состоит из последовательно соединенных отрезков копланарного волновода (КПВ) с волновыми сопротивлениями 50 и 20 Ω. Проводники КПВ с толщиной металлизации 2 мкм нанесены на гетероструктуру, состоящую из монокристалла MgO толщиной 0.5 мм и монокристаллической пленки $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ (BST) толщиной 40 нм. Топология ФК приведена на вставке рис. 1. Все размеры указаны в мм.

Приведенные размеры ФК определялись в ходе предварительного расчета частотных характеристик его комплексных коэффициентов отражения и передачи. Расчеты проведены с помощью коммерческих программ CST Studio и AWR. При этом ставилась задача получить в расчетном спектре пропускания ФК две четко различимые ФЗЗ, которые можно экспериментально наблюдать в рабочем диапазоне частот использовавшегося для измерений векторного анализатора СВЧ схем Agilent PNA-X Network Analyzer N5244A, в том числе при подаче напряжения смещения на сегнетоэлектрическую пленку, когда диэлектрическая проницаемость пленки уменьшается. Величина диэлектрической проницаемости пленки в зависимости от величины напряжения смещения оценивалась по методике, изложенной в [7].

Условием Брэгга, определяющим образование ФЗЗ, является кратность периода d ФК половине длины волны λ на центральной частоте запрещенной зоны. Максимальная ширина ФЗЗ имеет место, когда электрические длины элементов, образующих период ФК, равны. Такой ФК принято называть оптимизированным [6]. На рис. 1 приведены расчетные частотные зависимости фазового набега на каждом из двух образующих период ФК отрезков КПВ с волновыми сопротивлениями 50 и 20 Ω , геометрические размеры которых, приведенные на вставке, были получены в ходе проведенной оптимизации.

Расчет проведен для случая, когда напряжение смещения на пленку не подано. Отметим то обстоятельство, что фазочастотная характеристика участка КПВ с волновым сопротивлением 50 Ω представляет собой прямую линию, в то время как зависимость фазы от частоты для отрезка КПВ с волновым сопротивлением, существенно отличным от 50 Ω (в нашем случае это 20 Ω), является нелинейной. Это положение является общим для всех СВЧ аналогов ФК — независимо от применяемого типа линии передачи. Изменение длины участка КПВ приводит к изменению наклона его фазочастотной характеристики. Для получения оптимизированного ФК длины участков КПВ с разными волновыми сопротивлениями подбираются таким образом, чтобы фаза в точках пересечения их фазочастотных характеристик была равна 90°, 180°, 270°, 360° и т.д. Частоты, на которых фаза равна 90°, 270° и т.д., соответствуют центральным частотам ФЗЗ. На частотах, где фаза равна 180°, 360° и т.д., потери в полосе прозрачности между двумя соседними ФЗЗ будут минимальны.

На рис. 1 также приведены рассчитанные частотные характеристики модулей коэффициентов матрицы рассеяния ФК. Как видно из рис. 1, на частотах 14 и 42 GHz, на которых фазовый набег на обоих отрезках КПВ, составляющих период ФК, равен 90° и 270° соответственно, возникают две ФЗЗ, а на частоте 28 GHz, где фазовый набег равен 180° , имеет место минимум вносимых потерь в полосе прозрачности, расположенной между этими двумя ФЗЗ. Расчет проводился для значения диэлектрической проницаемости пленки BST $\epsilon_f = 800$. Эта величина определена с помощью предварительных экспериментов, в ходе которых измерялся фазовый набег на регулярном КПВ с волновым сопротивлением 50Ω . Полученная экспериментальная линейная зависимость, аналогичная прямой, изображенной на рис. 1, сопоставлялась с прямыми, рассчитанными для разных значений ϵ_f пленки. При $\epsilon_f = 800$ экспериментальная и расчетная прямые полностью совпадают.

На рис. 2 приведены экспериментально полученные частотные зависимости модулей коэффициентов отражения и передачи реализованного ФК. При проведении экспериментальных исследований на пленку BST от встроенного в векторный анализатор СВЧ схем источника напряжения подавалось смещение, плавно изменявшееся от 0 до 40 V. На рис. 2 изображены экспериментальные кривые при отсутствии напряжения смещения (0 V) и при напряжении смещения, равном 40 V.

Полученные экспериментальные результаты адекватны представленным на рис. 1 результатам проведенных расчетов. Как следует из приведенных на рис. 2 экспериментальных кривых, в диапазоне частот от 0.01 до 43.5 GHz (что соответствует рабочей полосе частот использовавшегося измерительного прибора) наблюдаются две четко различимые ФЗЗ. Центральная частота первой ФЗЗ равна 14 GHz, центральная частота второй ФЗЗ — 42 GHz. Это соответствует условию, когда набег фазы на каждом из двух отрезков КПВ, образующих период ФК, равен 90° . В таком случае центральная частота второй ФЗЗ должна быть равна утроенной центральной частоте первой ФЗЗ, а ширина ФЗЗ будет максимальна. При подаче напряжения смещения на пленку ее диэлектрическая проницаемость уменьшается. Одновременно с этим происходит снижение тангенса угла диэлектрических потерь [7]. При снижении диэлектрической проницаемости имеют место одновременное увеличение центральной частоты ФЗЗ (из-за роста длины волны λ в КПВ) и уменьшение ширины ФЗЗ из-за изменения оптимальной электрической длины образующих период ФК

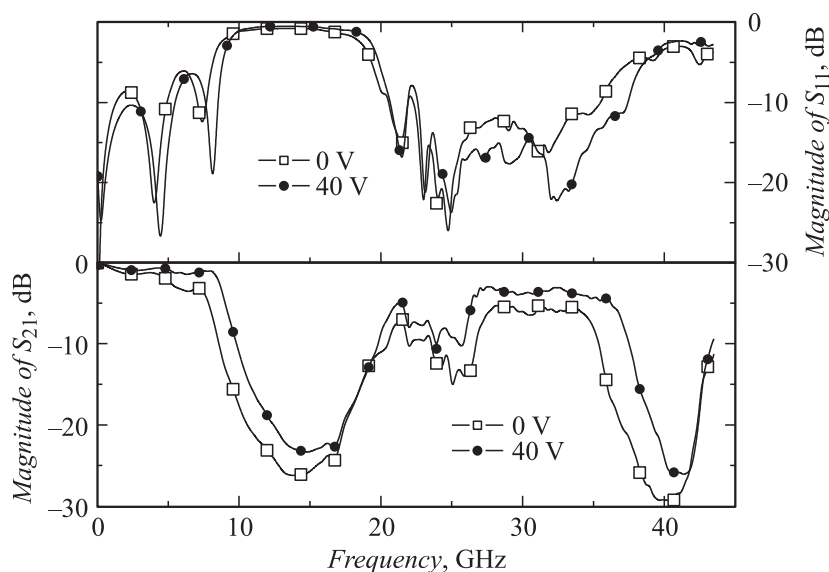


Рис. 2. Экспериментальные частотные зависимости модулей коэффициентов отражения S_{11} и передачи S_{21} ФК, полученные при отсутствии напряжения смещения (0 V) на пленке $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ и в случае приложения к пленке напряжения смещения 40 V.

отрезков КПВ. Поэтому ФЗЗ при увеличении напряжения смещения сдвигаются вверх по частоте относительно своего первоначального положения с одновременным уменьшением ширины полосы, как это видно на рис. 2. При этом потери в полосе прозрачности с ростом напряжения смещения снижаются за счет уменьшения тангенса угла диэлектрических потерь пленки BST.

Изменение напряжения смещения, приложенного к тонкой сегнето-электрической пленке, фактически эквивалентно изменению электрической длины отрезков КПВ, образующих период d ФК. Из условия Брэгга ($d = \lambda/2$) следует, что физические размеры ФК определяются длиной волны λ , соответствующей центральной частоте ФЗЗ. При увеличении напряжения смещения от 0 до 40 V центральная частота ФЗЗ, как это видно на рис. 2, сместилась вверх по диапазону частот на 0.75 GHz.

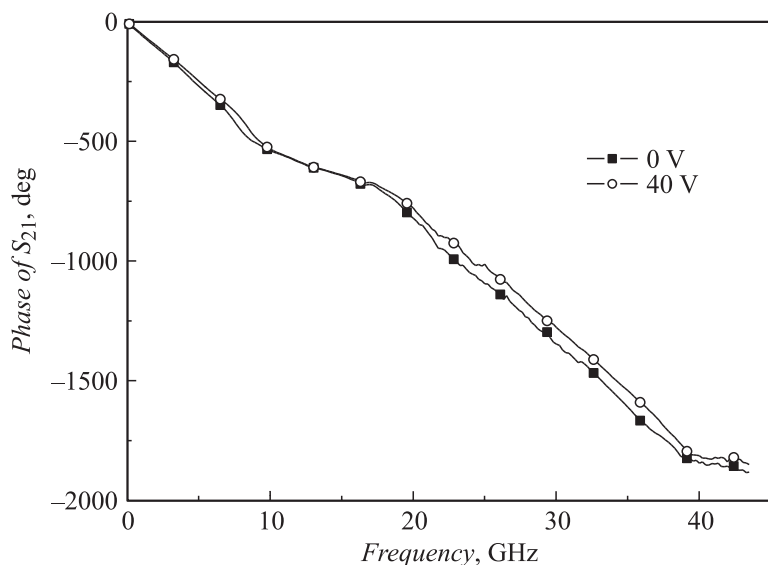


Рис. 3. Зависимость фазы коэффициента передачи S_{21} ФК от частоты, измеренная при отсутствии напряжения смещения (0 V) на пленке $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ и в случае приложения к пленке напряжения смещения 40 V.

На рис. 3 приведена экспериментально полученная частотная зависимость фазы коэффициента передачи S_{21} исследуемого ФК. Как можно видеть из приведенного графика, в частотном диапазоне 10–18 GHz, соответствующем первой ФЗЗ, фаза коэффициента передачи S_{21} , как это и следовало из параллельно проведенных расчетов, при подаче напряжения смещения не меняется. В то же время в полосе прозрачности между первой и второй ФЗЗ на частотах ~ 18 –38 GHz при увеличении напряжения смещения от 0 до 40 V имеет место изменение фазы коэффициента передачи S_{21} , достигающее в указанной полосе частот величины порядка 100° .

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что введение тонких пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ толщиной 40 nm позволяет не только уменьшить размеры ФК, но и перестраивать его амплитудно- и фазочастотные характеристики за счет подачи небольших напряжений смещения, приложенных к пленке.

Список литературы

- [1] *Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А.* // Вестник Российской академии наук. 2008. Т. 78. № 5. С. 438–457.
- [2] *Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф.* // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 6. С. 694–701.
- [3] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 8. С. 143–148.
- [4] *Humbert G., Le Floch J.-M., Mouneyrac D., Ferachou D., Aubourg M., Tobar M.E., Cros D., Blondy J.-M.* // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 051 108.
- [5] *Dragoman M., Cismaru A., Radoi A., Voicu M., Dragoman D.* // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. P. 253 106.
- [6] *Лазарев М.В., Мерзликин А.М.* // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 9. С. 15–29.
- [7] *Мухортов В.М., Маматов А.А., Зеленчук П.А., Головки Ю.И., Бирюков С.В., Масычев С.И.* // Нанотехника. 2007. № 3(11). С. 60–71.
- [8] *Гуляев Ю.В., Бугаев А.С., Митягин А.Ю., Чучева, Афанасьев М.С.* // Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 12. С. 3–10.