

*А.А. ГИРИЧ, канд. физ.-мат. наук, О.А. КРАВЧУК,  
С.И. ТАРАПОВ, д-р физ.-мат. наук*

## **УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРОМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ОГРАНИЧЕННОГО ПЛАНАРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА**

Процесс распространения электромагнитной волны через однородный (пространственно-неограниченный) фотонный кристалл (ФК) на сегодня достаточно хорошо изучен [1, 2]. При прохождении через такой кристалл излучения с длиной волны, сравнимой с размерами единичного элемента кристалла в спектре излучения образуются так называемые запрещенные и разрешенные зоны. Волновой процесс для разрешенных зон характеризуется действительными значениями волнового вектора, а для запрещенных зон – мнимыми.

Однако практический интерес представляют неоднородные (пространственно-ограниченные) фотонные кристаллы, в частности – фотонные кристаллы с нарушением периодичности, поскольку «дефектные» моды формирующиеся в таких структурах могут быть весьма высокодобротными.

Процесс распространения электромагнитной волны через пространственно-ограниченный фотонный кристалл с нарушением периодичности изучался многими авторами [3, 4, 9]. При этом выявлено много явлений, представляющих огромный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Важным моментом является формирование (при особых условиях) в запрещенной частотной зоне узких пиков [3], которые оказываются проявлением электродинамического аналога «Таммовского состояния» (ТС), хорошо известного в квантовой механике [5, 6].

Отметим, что классическое ТС [7] – это квантово-механическое состояние нерелятивистского электрона, находящегося в кристаллической решетке природного кристалла. В этом состоянии электроны: а) «концентрируются» вблизи поверхности ограниченного кристалла и б) их энергия, характеризующаяся узким уровнем, лежит в запрещенной энергетической зоне этого кристалла. Явление электродинамического ТС сводится к тому, что в пространственно-ограниченном фотонном кристалле: а) электромагнитная энергия, проходящая через ФК в виде волнового пакета, концентрируется вблизи границы такого фотонного кристалла и б) ширина волнового пакета весьма мала и основная частота его лежит в запрещенной частотной зоне этого кристалла. В результате, в запрещенной зоне возникает узкий пик пропускания – «Таммовский пик» (ТС-пик).

Сегодня, классические ТС, которые возникают на плоской границе раздела полубесконечного кристалла и какой-либо среды – диэлектрик, газ, вакуум, металл и т.д. хорошо изучены [5 – 7]. Поэтому, феномен классических ТС широко используется для теоретического описания процесса распространения и пространственного распределения электромагнитной волны в ограниченных ФК [3, 4], в широком диапазоне частот – от радиодиапазона до оптического. Это обусловлено тем, что математический аппарат, описывающий проявление классического ТС на границе кристалла [5] очень близок к математическому аппарату распространения волны в пространственно-ограниченном ФК [3].

Особый интерес современной электроники представляют так называемые планарные фотонные кристаллы, поскольку они обеспечивают высокую компактность электронных схем СВЧ диапазона [10]. Подробные теоретические (аналитические и численные) исследования, подтвержденные экспериментом, показали, что в таких кристаллах также присутствует явление ТС, описываемое аналогичным обычному фотонному кристаллу, математическим аппаратом [10 – 14].

Но, для практических целей наноэлектроники очень важным является возможность электронного управления / перестройки частоты ТС именно в планарном ФК.

Исследование литературы по данному направлению показало, что на сегодняшний день отсутствует сколько-нибудь полная информация о возможностях «управления» аналогом Таммовского состояния, т.е. сдвигом ТС-пика в пределах запрещенной зоны.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное изучение перестройки частоты электродинамического Таммовского состояния, возникающего в микроволновом диапазоне на границе планарного фотонного кристалла и плазмоподобной среды при помощи варакторного диода.

### Постановка и реализация задачи

Для реализации электрической перестройки частоты предложена структура одномерного (1D) ФК планарного типа [10]. Он представляет собой микрополосковую линию, периодически меняющуюся по ширине, имеющую  $N=6$  периодов (рис.1).

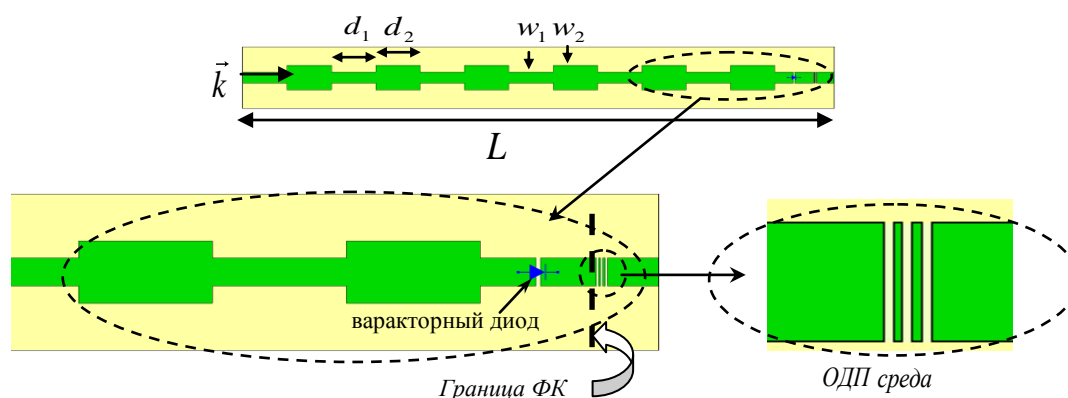


Рис. 1

Основой ФК является диэлектрик Rogers 3003 с диэлектрической проницаемостью среды  $\epsilon = 3.3$  и  $tg\alpha = 0.001$ . Геометрические размеры структуры выбраны так, чтобы удовлетворять условиям образования запрещенной зоны в диапазоне частот 2.5 – 5 ГГц:  $120 \times 10 \times 1.524$  мм. Длина узкого и широкого отрезков  $d_1 = d_2 = 15$  мм, ширина отрезков  $w_1 = 3.6$  мм,  $w_2 = 8$  мм соответственно (размеры отрезков сравнимы с длиной волны, распространяющегося излучения), высота ФК  $h = 1.524$  мм (рис.1).

При распространении электромагнитной волны вдоль такой линии на длинах волн, сравнимых с размером единичного элемента, возникает, как известно [10, 9], спектр с ярко выраженной зонной структурой. Численные расчеты, показывают, что первая запрещенная зона (для ненагруженного ФК) возникает в пределах 2.5 – 3.5 ГГц (рис.2, серая область, штриховая линия). Штрихпунктирная линия описывает расчет ФК, нагруженного (ограниченного) средой с отрицательной диэлектрической проницаемостью (ОДП средой). Хорошо видно возникновение ТС-пика на частоте  $f_{TC} \approx 2,8$  ГГц. Экспериментальные данные (жирная сплошная линия) подтверждают возникновение ТС-пика на той же частоте, который показан на рис.2.

Для анализа частотного спектра структуры использовался векторный анализатор цепей Agilent N-5230A. Зарегистрированы численные значения зависимости коэффициента пропускания от частоты в структуре. В результате эксперимента мы получили запрещенную зону в пределах 2.5 – 3.5 ГГц, что совпадает с расчетами (рис 2, серая область).

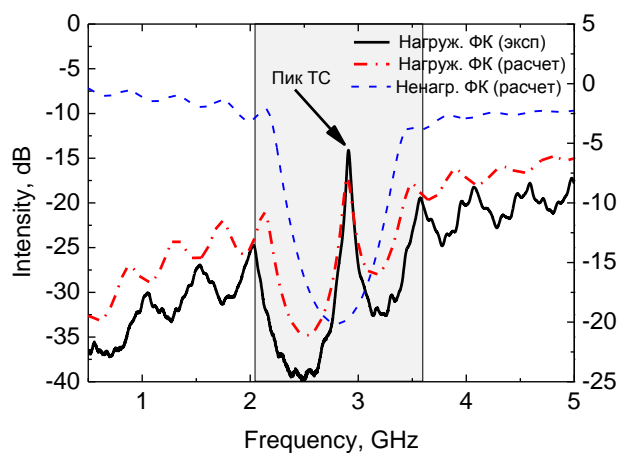


Рис. 2

Внешний вид структуры с вышеуказанными параметрами, через которую распространялась электромагнитная волна ( $\lambda_0 = 15$  мм) приведена рис. 3.

Далее для выполнения поставленной цели (перестройки частоты ТС) нам требуется ограничивающая среда и варакторный диод. Ограничивающая среда представляет собой среду [3] с отрицательной диэлектрической проницаемостью (ОДП). Как известно [3], изменение частоты ТС обуславливается изменением эффективного импеданса ОДП среды, ограничивающей ФК. В данном случае такой ОДП средой является предложенная нами [10, 11] система из трех щелей / слотов (рис. 1). Наиболее простым способом изменения импеданса такой среды, в данном случае, представляется изменение эффективной емкости системы слотов. Варакторный диод при этом является элементом, варьирующим эффективную емкость этой ОДП среды.

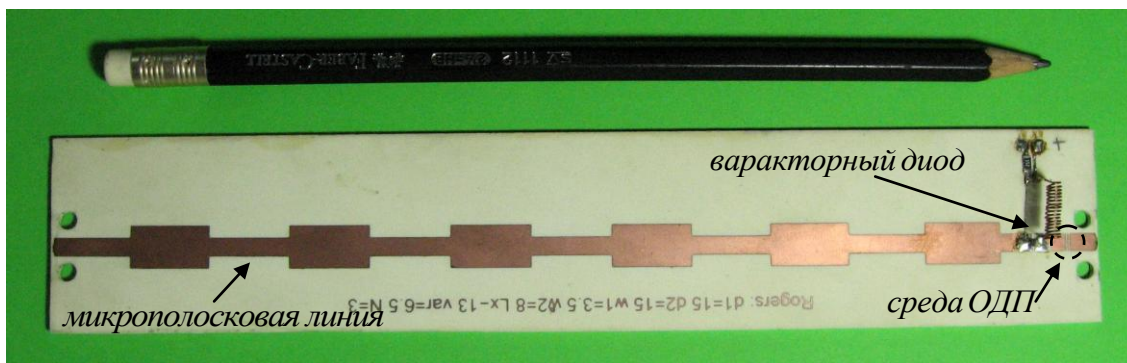


Рис. 3

Как видно из топологии исследуемого планарного ФК (рис. 3), структура ограничена системой из 3 щелей (ОДП среда), выполненных на микрополосковой линии. Ширина слотов  $t = 0.25$  мм. В центральной части последнего узкого отрезка (до слотов) располагался варакторный диод – диод с переменной емкостью (варикап). Емкость диода изменялась в пределах 0.1 – 2 пФ. Варикап подключен к структуре по представленной ниже схеме (рис.4, D1 – варакторный диод; L1 – индуктивность; R1 – сопротивление; DC Voltage – напряжение смещения; C1 – емкость).

Варьирование емкости ОДП среды осуществляется за счет изменения напряжения обратного смещения на диоде [8]. В результате, происходит изменение емкости диода, что приводит к изменению эффективной емкости всей ОДП среды и ее импеданса. Вследствие этого смещается частота ТС.

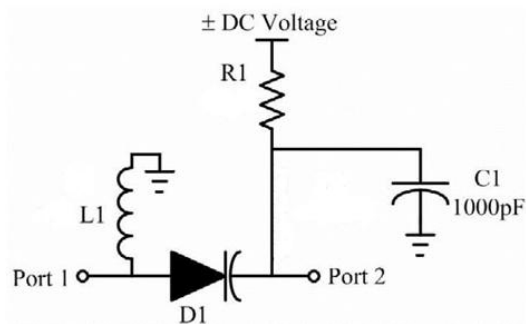


Рис. 4

На рис. 5 показана зависимость частоты ТС от обратного напряжения смещения на варакторном диоде. Расчет был проведен путем изменения емкости варакторного диода и построения зависимостей коэффициента пропускания от частоты для всей структуры. Соответствующее этой емкости обратное напряжение смещения выбиралось, исходя из паспортной зависимости емкости варакторного диода от обратного напряжения смещения на частоте 1 МГц.

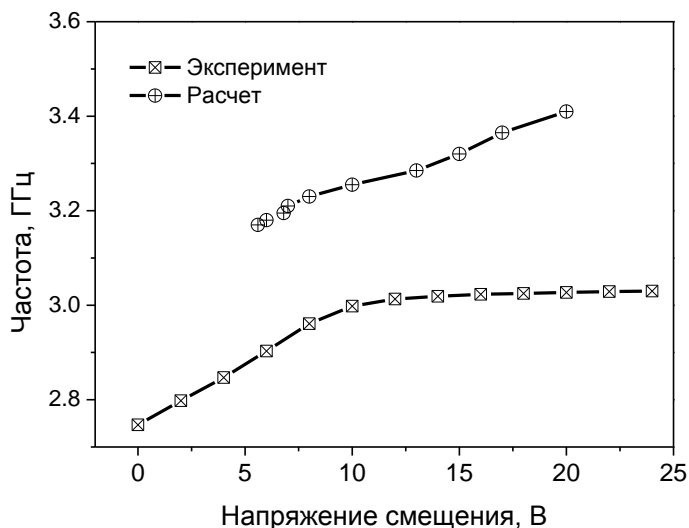


Рис. 5

Как видно из рис. 5, и в расчете, и в эксперименте частота ТС монотонно возрастает с увеличением обратного напряжения смещения на варакторном диоде, включенным в структуру. Наблюдающееся количественно расхождение между экспериментом и расчетом вызвано, скорее всего, тем, что паспортные данные для варакторного диода относятся к частоте намного более низкой, чем область частот эксперимента.

Таким образом, в ходе проведенных исследований:

- экспериментально и теоретически обнаружены условия возникновения электродинамического Таммовского состояния в запрещенной зоне планарного фотонного кристалла, ограниченного средой с варьируемым значением отрицательной диэлектрической проницаемости;
- экспериментально продемонстрирована перестройка частоты пика Таммовского состояния путем изменения напряжения обратного смещения на величину примерно 26 МГц/В.

**Список литературы:** 1. *Yablonovitch, E.* Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics / Yablonovitch E. // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 58. – P. 2059. 2. *Булгаков, А.А.* Сравнительная характеристика зонных спектров периодических структур, образованных слоями различных

материалов во внешнем магнитном поле / Булгаков А.А., Ханкина С.И., Шрамкова О.В., Яковенко В.М. // Радиопизика и электроника. – 2008. – Т. 13, №2. – С. 190-199. 3. *Виноградов, А.П., Дорофеев, А.В., Мерзликин, А.М., Лисянский, А.А.* Поверхностные состояния в фотонных кристаллах // УФН. – 2010. – Т.180, №3. – С. 249-263. 4. *Tarapov, S.I. and Belozorov, D.P.* Microwaves in Dispersive Magnetic Composite Media (Review Article) // Low Temperature Physics. – 2012. – Vol.38, No.7. – P. 766-792. 5. *Lifshitz, I.M., Pekar, I.M.* Tamm bounded states of electrons on the crystal surface and surface oscillations of lattice atoms // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. – 1955. – Vol.16, No.4. – P. 531-568. 6. *Дэвисон, С.* Поверхностные (таммовские) состояния / С. Дэвисон, Дж. Левин. – М. : Мир, 1973. – 232 с. 7. *Тамм, И.Е.* О возможном способе связи электрона на поверхности кристаллов / И.Е. Тамм // Z. Phys. – 1935. – Vol. 76, № 11-12. – P. 849-850. 8. *Shadrivov, I.V., Morrison, S.K. and Kivshar, Yu.S.* Tunable split-ring resonators for nonlinear negative-index metamaterials // OPTICS EXPRESS. – 2006. – Vol. 14, No 20. – P. 9344-9349. 9. *Averkov, Yu.O., Tarapov, S.I., Kharchenko, A.A. and Yakovenko, V.M.* Surface electromagnetic states in the photonic crystal–ferrite–plasma-like medium structure // Low Temp. Phys. – 2014. – Vol. 40. – P. 667-674. 10. *Belozorov, D.P., Girich, A.A., Tarapov, S.I.* Analogue of surface Tamm states in periodic structures on the base of microstrip waveguides // The Radio Science Bulletin. – 2013. – No 345. – P.64-72. 11. *Girich, A.A., Nedukh, S.V., Belozorov, D.P., Tarapov, S.I.* Analog of Tamm state in planar photonic crystal, bounded by the plasma-like medium // 8th International Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves (MSMW'13): int. conf., 23-28 June: conf. proc. – Kharkov, Ukraine, 2013. 12. *Khodzitsky, M.K., Kostlyova, O.V., Bulgakov, A.A., Girich, A.A., Tarapov, S.I.* Surface waves on the interface of magnetophotonic crystal and semiconductor // 3<sup>rd</sup> International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics: int. conf., 21-25 August: conf. proc. – London, UK, 2009. – P. 230-232. 13. *Belozorov, D.P., Girich, A.A., Nedukh, S.V., Moskaltsova, A.N. and Tarapov, S.I.* Microwave Analogue of Tamm states in periodic chain-like structures // PIER Letters. – 2014. – Vol. 46. – P. 7-12. 14. *Girich, A.A., Miliayev, M.A., Nedukh, S.V., Shuba, A., and Tarapov, S.I.* A planar photonic crystal-based resonance cell for ferromagnetic resonance spectrometer // Telecommunications and Radio Engineering. – 2014. – Vol. 73, No.8. – P. 749-755.

*Институт радиопизики и электроники НАН Украины,*

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 11.11.2015*