

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СОСТОЯНИЯ
И ЛЕВОСТОРОННИЕ СВОЙСТВА
В СТРУКТУРЕ ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ – ФЕРРИТ – ПЛАЗМОПОДОБНАЯ СРЕДА**

Электродинамические поверхностные электромагнитные состояния (ПЭМС) представляют собой однородные вдоль поверхности электромагнитные колебания с нулевым тангенциальным волновым числом. Известно, что ПЭМС могут возникать на границе плазмopodobной среды (ПС) и фотонного кристалла (ФК) и на границе двух ФК. Огибающие амплитуд полей таких колебаний экспоненциально спадают при удалении от границы раздела сред [1]. Возможность существования таких состояний на границе между средой с отрицательной диэлектрической проницаемостью (плазмopodobной средой) и средой с отрицательной магнитной проницаемостью была впервые отмечена в работах [2, 3]. В работе [1] было показано, что ПЭМС являются прямым электромагнитным аналогом таммовских электронных состояний [4]. Практический интерес к ПЭМС связан с тем, что такие состояния и структуры, в которых они реализуются, могут быть использованы для создания различных СВЧ устройств, а именно фильтров, поляризаторов и др. В настоящее время выполнено большое количество теоретических и экспериментальных исследований ПЭМС на границах ПС и ФК [1, 5 – 7], а также на границе раздела сред двух ФК [1, 8]. В частности, в работе [7] теоретически исследовалось влияние постоянного магнитного поля на свойства ПЭМС на границе ПС и диэлектрического ФК при наличии постоянного магнитного поля. Свойства ПЭМС на границе магнитофотонного и диэлектрического ФК в постоянном магнитном поле детально были проанализированы в ряде работ, обобщенных в обзоре [8].

Ввиду возможности применения ПЭМС (электродинамических таммовских состояний) в современных электронно-управляемых СВЧ устройствах актуальной остается задача об управлении характеристиками этих устройств с помощью внешних параметров. Поэтому в настоящей работе экспериментально изучена зависимость спектра пропускания структуры ФК – феррит – плазмopodobная среда от внешнего постоянного магнитного поля и температуры. Интересным является тот факт, что для исследуемой структуры в некоторых областях частот (где оба материальных параметра будут принимать отрицательные значения) будет наблюдаться переход от спектра с ПЭМС (далее будем называть таммовскими состояниями) к «левостороннему» характеру спектра. Именно исследованию этого перехода посвящена эта статья.

Постановка задачи и описание методики эксперимента

Экспериментальные исследования проводились в диапазоне частот 22 – 40 ГГц с помощью векторного анализатора электрических цепей Agilent Network Analyzer N5230A [8]. Металлический полый волновод, в который была помещена исследуемая структура, располагается между полюсами электромагнита (рис. 1). На эту структуру перпендикулярно слоям падает плоская линейно поляризованная электромагнитная волна. Постоянное магнитное поле \vec{H} прикладывается параллельно плоскости слоев (рис. 1).

Исследуемая структура представляет собой одномерный диэлектрический фотонный кристалл (ФК), состоящий из периодически составленных восьми элементарных ячеек [6]. Каждая ячейка состоит из слоя кварца ($d_{кв} = 2 \text{ мм}$) и тефлона ($d_{т} = 1.24 \text{ мм}$).

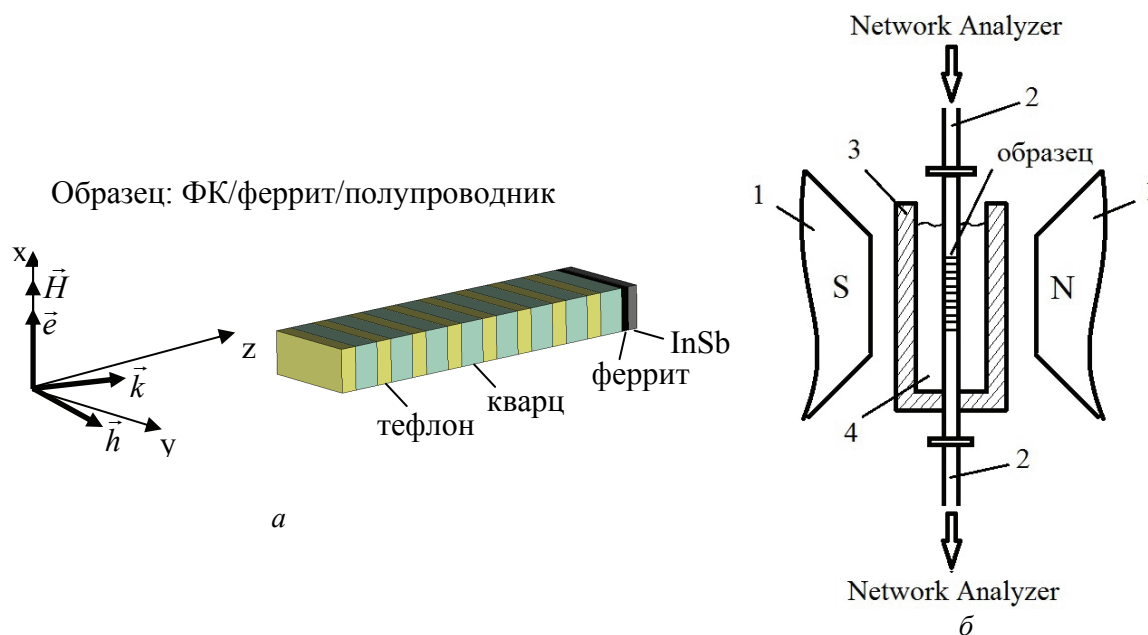


Рис.1. Схема исследуемой структуры – *a* и эксперимента – *б*: 1 – полюса электромагнита, 2 – полые металлические волноводы, 3 – термоямкость, 4 – жидкий азот (N_2)

Типичный вид экспериментально зарегистрированного спектра для ФК представлен на рис.2 – черная кривая. Далее к ФК был присоединен слой феррита ($d_{фер} = 0.4 \text{ мм}$) и слой полупроводника – InSb ($d_{InSb} = 0.55 \text{ мм}$) – красная кривая на рис.2. Как видно из графика, для структуры ФК – феррит – InSb, на частоте 26,9 ГГц формируется таммовский пик обусловленный возникновением поверхностного колебания на границе ФК – феррит – InSb.

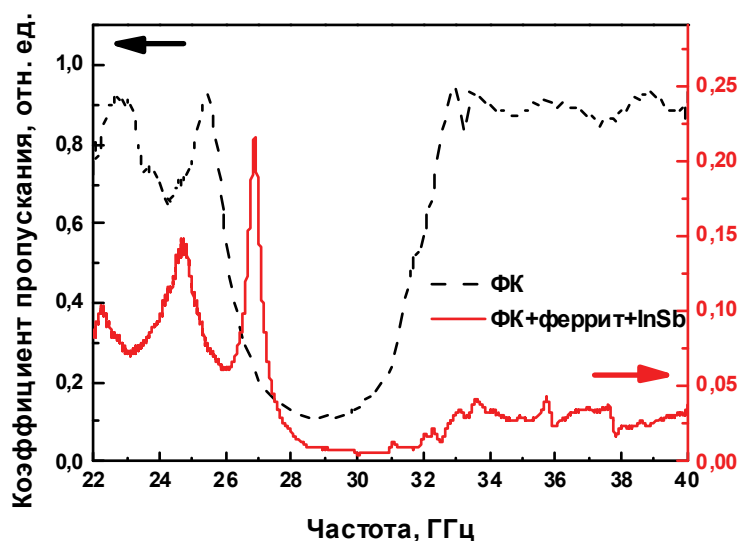


Рис. 2. Спектр пропускания структуры ФК/феррит/InSb, при $H_{внеш}=0 \text{ Э}$

Анализ результатов

В ходе экспериментальных исследований оказалось, что для данной структуры существует и поверхностное колебание (таммовский пик) и при определенных полях – пик, вызванный «левосторонними» свойствами структуры (ЛС-пик). Так как для существования «левосторонних» свойств необходимо, чтобы одновременно и эффективная диэлектрическая (ϵ') и эффективная магнитная (μ') проницаемости в структуре были отрицательны, то очевидно,

что для нашей структуры такие свойства среды могут проявляться только в области вблизи частоты ферромагнитного резонанса (ФМР) где $\mu' < 0$ – заштрихованная область на рис. 3. Таким образом, в нашей структуре за отрицательную диэлектрическую проницаемость отвечает слой плазмopodobной среды, а за отрицательную магнитную проницаемость – слой феррита вблизи ФМР. Анализируя рис. 3, отметим, что в спектре пропускания структуры при малых магнитных полях ($H_{внеш} < 4,2 \text{ кЭ}$) наблюдается возникновение таммовского пика (рис. 3, кривая 2). Его частотное положение изменяется монотонно, практически линейно.

При повышении магнитного поля, когда частота таммовского пика достигает области, где $\mu' < 0$ (область вблизи ФМР, рис. 4 – область ЛС-пика) таммовский пик исчезает и на его месте наблюдаем пик пропускания иной природы – ЛС-пик (рис. 3, кривая 3). Он вызван «левосторонними» свойствами структуры, а именно – в этой области оба материальных параметра отрицательны: $\varepsilon' < 0$ обусловлено свойствами плазмopodobной среды, а $\mu' < 0$ областью вблизи ФМР для слоя феррита.

Продолжение кривой 2, соответствующей таммовскому пику, на высоких полях ($H_{внеш} > 8 \text{ кЭ}$) ожидается практически линейное (рис. 3, кривая 2'). Это связано с тем, что в данном диапазоне частот (вдали от ФМР) дисперсия магнитной проницаемости феррита слабо зависит от поля и имеет монотонно убывающий характер, практически линейный. Однако оказалось, что продолжение кривой 2 (рис. 3, кривая 2'') идет ниже, хоть и незначительно ($\Delta f \approx 1,5 \text{ ГГц}$). При этом характер этой кривой остается прежним – слабо зависящим от внешнего магнитного поля. По-видимому, данный сдвиг по частоте связан с различными значениями μ' для правой ($f > f_{ФМР}$) и левой ветвей ($f < f_{ФМР}$) магнитной проницаемости вдали от ФМР (рис. 4). В случае, когда $f \ll f_{ФМР}$ (левая ветвь μ'), μ' постепенно будет уменьшаться с понижением частоты и в конце концов достигнет значения некой константы. В случае когда $f \gg f_{ФМР}$ (правая ветвь μ'), μ' с ростом частоты будет стремиться к единице.

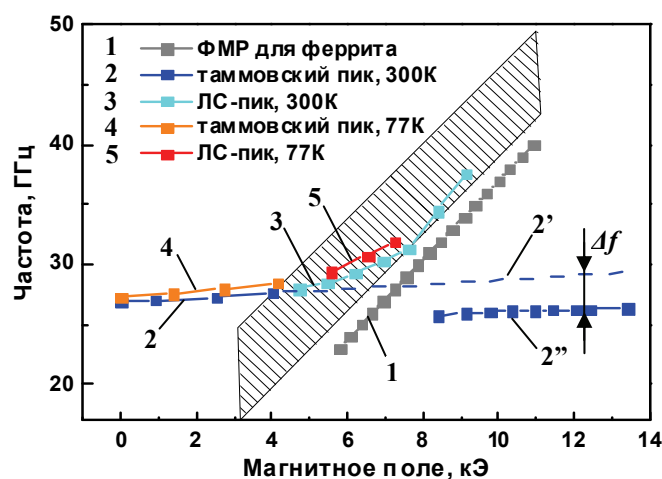


Рис. 3. Частотно-полевая зависимость для линии ФМР (линия 1), таммовского пика (линии 2, 2'', 4), ЛС-пика (линии 3, 5); область, где $\mu' < 0$, заштрихована

Следует отметить, что на высоких полях ($H_{внеш} > 8 \text{ кЭ}$) в нашем рабочем диапазоне частот ($f = 22 - 40 \text{ ГГц}$) наблюдается одновременно два пика: на более высоких частотах ($f \approx 30 - 40 \text{ ГГц}$) ЛС-пик, с сильной зависимостью от внешнего магнитного поля (рис.3, кривая 3) ввиду сильной дисперсии μ' вблизи ФМР; а на частотах $f \approx 25 - 27 \text{ ГГц}$ – таммовский пик (2 – синяя кривая) – со слабой зависимостью от внешнего магнитного поля, т.к. дисперсия магнитной проницаемости вдали от ферромагнитного резонанса слабая.

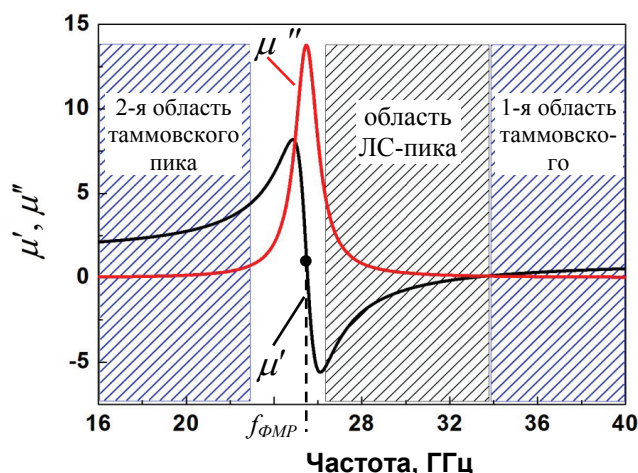


Рис. 4. Компоненты магнитной проницаемости феррита марки 1СЧ4, рассчитанная для $H_{\text{внеш}}=6500$ Э

Кроме того, из рис. 3 видно, что с понижением температуры до 77 К частота таммовского пика возрастает. С понижением температуры в исследуемой структуре проявляются два конкурирующих механизма, ответственных за характер зависимости $f(T)$. Первый – при понижении T падает число свободных носителей в InSb, что приводит к уменьшению частоты. Второй – при понижении T уменьшается величина потерь в феррите и элементах ФК, что приводит к росту частоты. Наиболее вероятно, что второй механизм преобладает в области $T = 77 - 300$ К.

Выводы

Таким образом, в результате экспериментальных исследований были зарегистрированы спектры пропускания структуры фотонный кристалл – феррит – плазмоподобная среда в зависимости от внешнего магнитного поля и температуры. Показано, что при слабых магнитных полях ($H_{\text{внеш}} < 4,2$ кЭ) возникает лишь таммовское состояние, а при высоких полях $H_{\text{внеш}} > 8$ кЭ в запрещенной зоне фотонного кристалла формируется два пика пропускания:

- 1) первый связан с возникновением таммовского состояния на границе ФК-феррит/InSb.
- 2) второй связан с «левосторонними» свойствами структуры – пик вблизи частоты ФМР на больших частотах, чем частота ФМР.

Автор выражает благодарность Аверкову Ю.О., Тарапову С.И. и Яковенко В.М. за помощь в обсуждении результатов.

Работа частично поддержана грантом молодых ученых НАН Украины №10/13 («Пион»).

Список литературы: 1. Vinogradov, A.P., Dorofeenko, A.V., Erokhin, S.G. [et al.] Surface state peculiarities in one-dimensional photonic crystal interfaces // Physical Review B. – 2006. – V. 74, No. 4. – P. 045128. 2. Ali A., Engheta N. Guided Modes in a Waveguide Filled With a Pair of Single-Negative (SNG), Double-Negative (DNG), and/or Double-Positive (DPS) Layers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2004. – V. 52, No. 1. – P. 199-210. 3. Ali A., Engheta N. Distributed-Circuit-Element Description of Guided-Wave Structures and Cavities Involving Double-Negative or Single-Negative Media // In Proceedings SPIE: Complex Mediums IV: beyond Linear Isotropic Dielectrics. – San Diego, CA, August 4-5, 2003. – V. 5218. – P. 145-155. 4. Тамм, Л.Е. // Physic Zeits Sowjetunion 1, 733 (1932). 5. Басс, Ф.Г., Булгаков, А.А., Тетервов, А.П. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 288 с. 6. Аверков, Ю.О., Тарапов, С.И., Харченко, А.А., Яковенко, В.М. Поверхностные электромагнитные состояния в структуре фотонный кристалл – феррит – плазмоподобная среда // Физика низких температур. – 2014. – Т.40. – N.7. – (в печати). 7. Аверков, Ю.О., Белецкий, Н.Н., Тарапов, С.И., Харченко, А.А., Яковенко, В.М. Поверхностные электромагнитные состояния на границе фотонный кристалл – плазмоподобная среда во внешнем магнитном поле // Радиопизика и электроника. – 2012. – Т.3(17). – N.3. – С. 48-56. 8. Tarapov, S.I., Belozorov, D.P. Microwaves in Dispersive Magnetic Composite Media (Review Article) // Low Temperature Physics. – 2012, V.38. – N.7 – P.766-792. 9. 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. – N.345 – P.64-72.