

УДК 621.37

С.А. Ходенков, Н.М. Боев

Исследование распределения высокочастотных токов в полосковых проводниках фильтра на основе двумерного электромагнитного кристалла

Предложена конструкция микрополоскового полосно-пропускающего фильтра четвертого порядка на основе двумерного электромагнитного кристалла. Получено распределение высокочастотных токов в полосковых проводниках устройства. Показано, что сигнал последовательно распространяется от одного резонатора к другому, это позволяет реализовать фильтр с высокими частотно-селективными свойствами.

Ключевые слова: полосно-пропускающий фильтр, электромагнитный кристалл.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-4-64-66

Электромагнитными кристаллами принято называть периодические структуры, обладающие способностью подавлять распространение через них электромагнитных излучений в определенных частотных диапазонах, называемых запрещенными зонами [1, 2]. Селективные устройства на основе таких пространственных структур хорошо зарекомендовали себя в оптическом диапазоне и в настоящее время широко исследуются конструкции на их основе, применяемые уже в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне [3–7].

В настоящей работе представлена конструкция полосно-пропускающего фильтра четвертого порядка, реализованного на основе двумерного (2D) электромагнитного кристалла (рис. 1), его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) рассчитана при помощи электродинамического численного анализа 3D-модели. При этом в расчетах использовались следующие параметры подложки: диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 9,8$ и толщина $h = 1$ мм. 50Ω-порты подключались к входному и выходному отрезку полоскового проводника l . Настройка фильтра осуществлялась «ручным» параметрическим синтезом, при котором подбирались длина и ширина отрезков полосковых проводников, а также величина зазоров между ними.

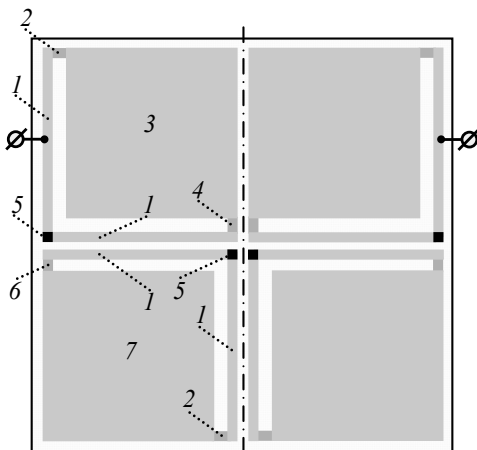


Рис. 1. Топология полосковых проводников (серый или черный цвет) фильтра на основе 2D-электромагнитного кристалла

Центральная частота полосы пропускания $f_0=1$ ГГц, также как и относительная ширина полосы пропускания $-\Delta f/f_0 = 20\%$, были зафиксированы (рис. 2).

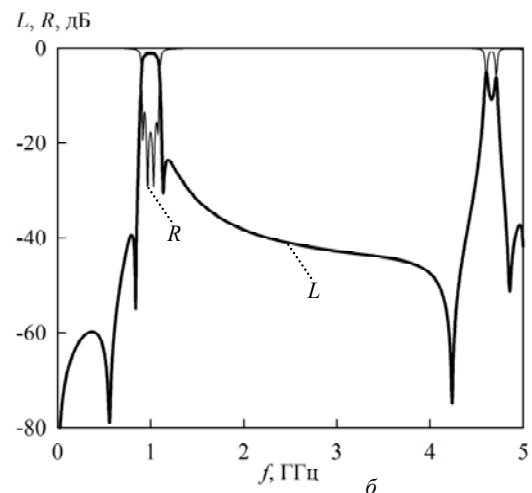
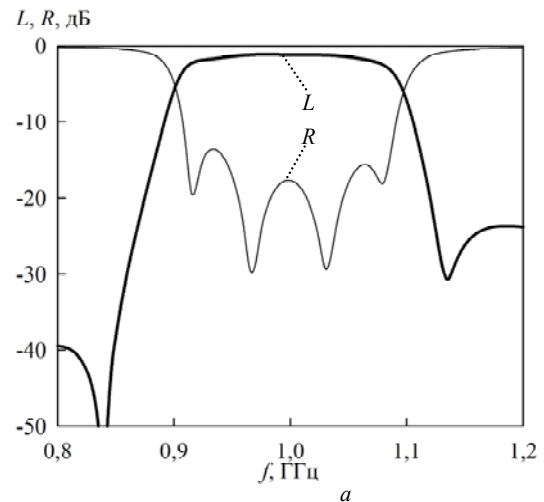


Рис. 2. АЧХ фильтра на основе 2D-электромагнитного кристалла в широком диапазоне частот (б) и в узком (а):

L – прямые потери мощности;
 R – обратные потери мощности

Отметим, что в конструкции использовано заземление полосковых проводников на основании

(позиция 5 на рис. 1), которое можно реализовать в виде сквозного отверстия высотой h в диэлектрической подложке, заполненного проводящим материалом. Размеры всех четырех квадратных отверстий 5 одинаковы и составляют величину $0,3 \times 0,3 \text{ мм}^2$. При этом узкие протяженные отрезки полосковых проводников 1 соединены с широкими отрезками 3 или 7 при помощи узких коротких отрезков 2, 4 или 2, 6. Все они расположены с верхней стороны диэлектрической подложки, на нижнюю сторону которой нанесено заземляемое металлизированное основание.

На рис. 3 и 4 схематически представлено распределение высокочастотных токов в полосковых проводниках исследуемого полосно-пропускающего фильтра, полученное с использованием в 3D-модели слабой емкостной связи входного и выходного резонаторов с 50Ω -портами, что можно реализовать при помощи «воздушного» зазора. При этом поочередно были зафиксированы частоты первого, второго, третьего и четвертого резонансов, формирующих полосу пропускания устройства.

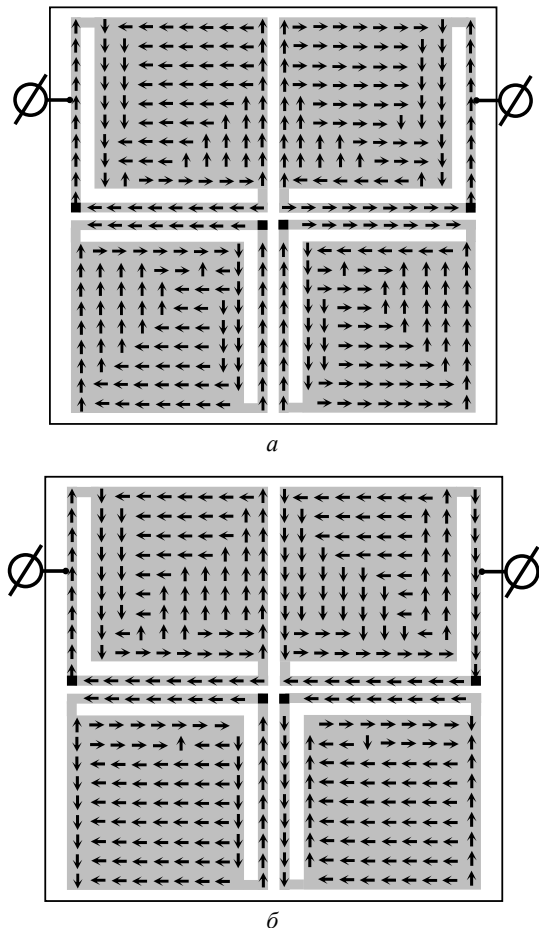


Рис. 3. Распределение высокочастотных токов в полосковых проводниках фильтра 4-го порядка: *a* – на частотах I резонанса; *б* – на частотах II резонанса

Как и следовало ожидать, амплитуда высокочастотных токов на узких протяженных отрезках полосковых проводников значительно превосходит амплитуду токов на широких квадратных отрезках.

В результате индуктивное взаимодействие во всех резонаторах гораздо сильнее емкостного, благодаря этому сигнал с входного резонатора передается к первому резонатору второго ряда, далее ко второму резонатору этого же ряда, и уже только затем к выходному резонатору.

Как видно из рис. 3, *a*, на частотах самого низкочастотного резонанса, формирующего полосу пропускания, на протяженных узких параллельных отрезках полосковых проводников взаимодействующих резонаторов векторы высокочастотных токов сонаправлены. Очевидно, что на частотах четвертого, самого высокочастотного резонанса, эти векторы будут встречно-направлены (рис. 4, *б*).

На частотах второго резонанса, на этих же протяженных параллельных отрезках проводников, вектора токов сонаправлены для резонаторов первого и второго рядов и встречно-направлены для резонаторов второго ряда (рис. 3, *б*). На частотах третьего резонанса – соответственно наоборот (4, *a*).

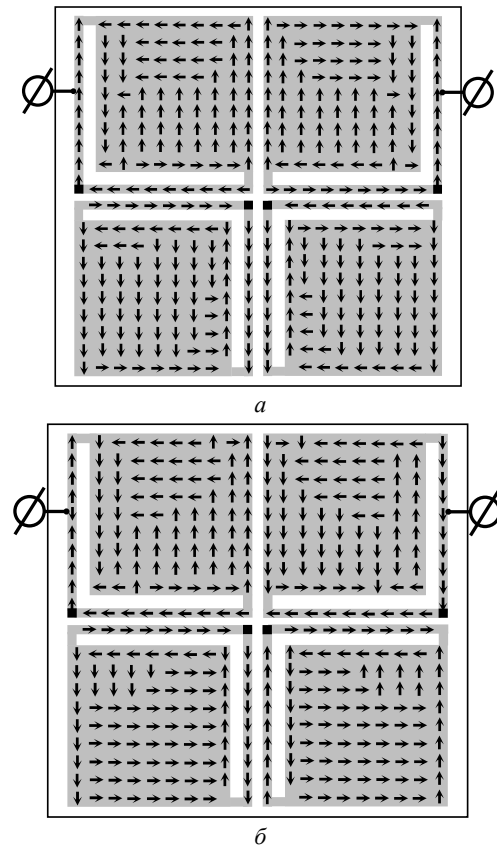


Рис. 4. Распределение высокочастотных токов в полосковых проводниках фильтра 4-го порядка: *a* – на частотах III резонанса; *б* – на частотах IV резонанса

Важно отметить, что за счет большого скачка волновых сопротивлений отрезков линий в представленном фильтре реализуется протяженная высокочастотная полоса заграждения (см. рис. 2). При этом на АЧХ вблизи обоих склонов полосы пропускания наблюдаются полюса затухания мощности, что существенно увеличивает крутизну каждого склона. Появлению полюсов затухания мощности

способствует преимущественно емкостное взаимодействие между резонаторами первого ряда.

Геометрические размеры фильтра, с учетом отступов проводников от краев подложки на величину 1 мм, составляют $20,70 \times 20,65 \times 1,00$ мм³. Размеры отрезков полосковых проводников фильтра:

- (1) – $8,80 \times 0,30$ мм²; (2) – $0,70 \times 0,30$ мм²;
 (3) – $8,20 \times 8,10$ мм²; (4) – $0,60 \times 0,25$ мм²;
 (5) – $0,30 \times 0,30$ мм²; (6) – $0,40 \times 0,30$ мм²;
 (7) – $8,40 \times 8,10$ мм².

Зазоры между резонаторами одного ряда – 0,45 мм, между рядами – 0,40 мм. Экспериментальный макет фильтра показывает хорошее согласие рассчитанной АЧХ с измеренной.

Таким образом, предложена конструкция полосо-пропускающего фильтра на основе 2D-электромагнитного кристалла. Показано распределение высокочастотных токов на частотах четырех резонансов, формирующих полосу пропускания. На частотах первого резонанса в параллельных микрополосковых линиях с преимущественно индуктивным взаимодействием векторы высокочастотного тока во всех отрезках протяженных полосковых проводников сонаправлены. На частотах четвертого резонанса – наоборот, все векторы встречно-направленные. На частотах второго и третьего резонансов данные векторы на одних параллельных участках сонаправлены, на других – встречно-направлены. Благодаря уникальной топологии полосковых проводников сигнал последовательно распространяется от одного резонатора с большим скачком волновых сопротивлений отрезков линий к другому. Поэтому исследованный фильтр четвертого порядка обладает высокими частотно-селективными свойствами: увеличенной крутизной обоих склонов полосы пропускания и расширенной высокочастотной полосой заграждения.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант МК-9119.2016.8.

Литература

1. Ветлужский А.Ю. Эффективные электрофизические свойства металлических электромагнитных кристаллов / А.Ю. Ветлужский // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 1. – С. 18–19.
2. Беляев Б.А. Исследование микрополосковых моделей полосо-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах / Б.А. Беляев, А.С. Волошин, В.Ф. Шабанов // ДАН. – 2005. – Т. 400, № 2. – С. 181–185.
3. Belyaev V.A. Investigation of the Q-factor of optical resonators in photonic crystals and principles of designing highly selective filters on their basis / V.A. Belyaev, V.V. Turnev, V.F. Shabanov // Russian Physics Journal. – 2014. – Vol. 56, No. 12. – PP. 1378–1386.

4. Isaac C.A. Dispersion in One-Dimensional Photonic Band Gap Periodic Transmission Lines / C.A. Isaac // Submitted to Microwave and Optical Technology Letters. – 2008. – No. 11. – PP. 689–692.

5. Mollah M.N. A Binomially Distributed Photonic Bandgap Structure (PBGS) and Its Application to Bandpass Filter / M.N. Mollah, N.C. Karmakar, J.S. Fu // International Journal of RF and Microwave Computer – Aided Engineering. – 2006. – No. 16. – PP. 355–366.

6. Беляев Б.А. Исследование частотно-селективных устройств, построенных на основе микрополоскового двумерного фотонного кристалла / Б.А. Беляев, С.А. Ходенков, В.Ф. Шабанов // ДАН. – 2016. – Т. 467, № 4. – С. 400–404.

7. Усанов Д.А. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, М.Ю. Куликов, Д.В. Пономарев // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, № 8. – С. 143–148.

Ходенков Сергей Александрович

Канд. техн. наук, доцент каф. физики
 Сибирского государственного аэрокосмического
 университета им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск
 Тел.: +7-923-306-87-92
 Эл. почта: hsa-sibsau@mail.ru

Боев Никита Михайлович

Вед. инж. лаб. электродинамики и СВЧ-электроники
 Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН,
 г. Красноярск
 Тел.: +7-908-220-89-67
 Эл. почта: nik88@inbox.ru

Khodenkov S.A., Boev N.M.

Investigation of distribution of high-frequency currents in filter strip conductors based on a 2D electromagnetic crystal

The design of the bandpass filter based on a 2D electromagnetic crystal is suggested. Parametric synthesis of the construction was carried out with the help of numerical electrodynamic analysis of 3D-model. Also distributions of high-frequency currents at the frequencies of four resonances forming bandwidth were observed. At first resonance frequencies of the of high-frequency current vectors, in all segments of parallel gaunt strip conductors, are co-directional. At frequencies of the fourth resonance – on the contrary, all of the vectors are counter-directional. At frequencies of the second and third resonances the vectors on one parallel section are co-directional, but on other section they are counter-directional. Due to unique topology of strip conductors, the signal sequentially propagate from one resonator to other. Therefore the studied filter of the fourth order possesses high frequency-selective properties: increased steepness of both slopes of bandwidth and expanded high-frequency stop band.