

09

Электронное управление параметрами структур с фотонной запрещенной зоной

© Н.В. Бритун, В.В. Данилов

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Украина
E-mail: britun@mail.univ.kiev.ua

Поступило в Редакцию 22 октября 2002 г.

Рассмотрен частный случай сверхвысокочастотной (СВЧ) фильтрации на основе периодических металлизированных феррит-диэлектрических структур. Осуществлено электронное управление в реальном времени спектральными характеристиками СВЧ-фильтра на таких структурах.

1. Введение. Исследования структур с фотонной запрещенной зоной (или photonic band-gap–PBG-структур) интенсивно развиваются начиная с 1980-х гг. Искусственные материалы, создаваемые на их основе, — фотонные кристаллы [1] — изучаются как в оптическом, так и в СВЧ-диапазонах. Одним из применений PBG-материалов в СВЧ-диапазоне является создание фильтров на основе металл-диэлектрических структур [2]. Металлизированные PBG-структуры, расположенные в СВЧ-волноводе, создают периодическое распределение импеданса, что позволяет, учитывая проводящий характер стенок волновода, говорить о наличии внутри металлизированной „кристаллической решетки“. Отражаясь от соответствующих „кристаллографических плоскостей“ и интерферируя, излучение формирует соответствующие зоны пропускания и заграждения, наблюдаемые в эксперименте. Так, при размещении периодическим образом в волноводе шаблонов в виде матрицы из $n \times m$ металлических дисков [2] имеет место „кристаллическая решетка“ тетрагональной сингонии. СВЧ-излучение падает на нее перпендикулярно плоскостям [001].

Для качественного объяснения наличия зон заграждения в спектре подобного PBG-фильтра используют известную формулу Вульфа–Брэгга или, как следствие, условие равенства продольного периода кристаллической решетки целому числу полуволен в окрестности зоны

заграждения:

$$2d \sin \theta = k\lambda, \quad d = k \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где d — межплоскостное расстояние, k — целое число, λ — длина волны в волноводе. Угол скольжения $\theta = 90^\circ$.

Актуальной остается проблема электронного управления амплитудно-частотными характеристиками РВГ-структур в реальном времени. Работы по данной проблеме в основном затрагивают оптический диапазон. Так, в [3] теоретически исследована принципиальная возможность перестройки для двумерных РВГ-структур. В [4] перестройка достигается контролем степени заполнения пор синтетического опала на стадии его изготовления. В [5] перестройка может осуществляться скачком, что обусловлено фазовым переходом в материале заполнения синтетического опала при соответствующей температуре. Работы [6] и [7] непосредственно затрагивают проблему перестройки РВГ-структур оптического диапазона в реальном времени. Здесь для этой цели рассматривается заполнение пор опала нематическими жидкими кристаллами, изменяя ориентацию которых во внешнем электрическом поле, можно получить изменение фотонной плотности состояний в кристалле. В [8] перестройка РВГ на жидких кристаллах имеет место при изменении температуры. Однако, хотя в работах [5–9] процесс перестройки и осуществим в реальном времени, все же относительная величина перестройки весьма невелика.

В данной работе представлены результаты электронной перестройки в реальном времени спектров РВГ-структур для СВЧ-диапазона.

II. Эксперимент и результаты. В экспериментах использовались шаблоны из $n \times m = 1 \times 2$, 2×4 и 3×6 металлических дисков и шаблоны в виде узкой металлической полоски, расположенной по центру волновода перпендикулярно его широкой стенке. Для заполнения применялись: СВЧ-пенопласт ($\varepsilon \approx 1$, $\text{tg } \delta \approx 0$), пластины поликора Al_2O_3 толщиной 1 мм ($\varepsilon = 9.6$, $\text{tg } \delta \approx 15 \cdot 10^{-4}$) и пластины поликристаллического железоиттриевого граната (ЖИГ) толщиной также 1 мм, полностью перекрывающие сечение волновода ($\varepsilon \approx 15$, $\text{tg } \delta \approx 2 \cdot 10^{-4}$). Везде использовалась волноводная мода TE_{10} для 3 см волновода в диапазоне частот 7.8–12.5 GHz. Толщина металлизации составляла от 1 до $20 \mu\text{m}$ и превышала толщину скин-слоя как минимум на порядок.

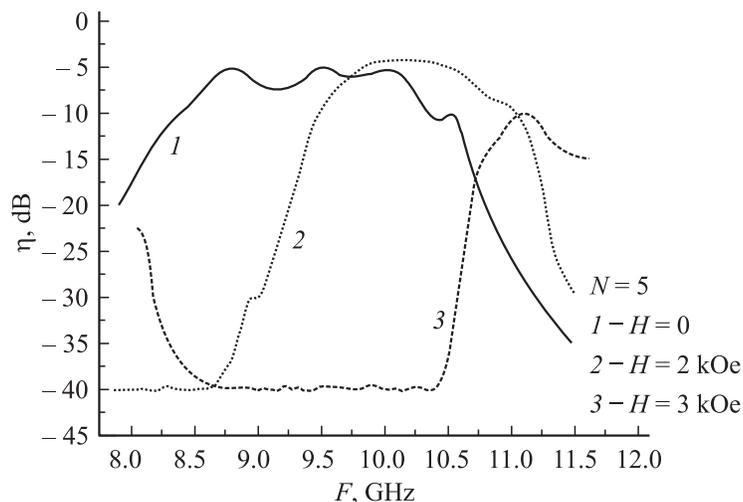


Рис. 1. Перестройка полосы пропускания PBG-фильтра под действием внешнего магнитного поля H .

Типичный вид амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтра на металлизированных PBG-структурах без внешнего влияния представлен кривыми 1 на рис. 1 и 2, а.

Для осуществления перестройки АЧХ такого фильтра было использовано однородное внешнее магнитное поле. В качестве материала заполнения волновода в этом случае дополнительно применялись пластины ЖИГ. Используя этот феррит в режиме подмагничивания, был получен сдвиг полосы пропускания СВЧ-фильтра во внешнем поле (рис. 1). В данном эксперименте использовано 5 слоев металлизированных шаблонов из 2×4 дисков. Каждый слой представлял собой шаблон, прилегающий к пластине ЖИГ, и 6 пластин поликора. Магнитное поле было направлено в плоскости ферритовой пластины перпендикулярно широкой стенке волновода.

В качестве альтернативных элементов металлизации нами было предложено использовать узкие полоски, расположенные в центре волновода перпендикулярно широкой стенке, не касаясь ее. Как известно из техники СВЧ, проводящие полоски создают периодическое

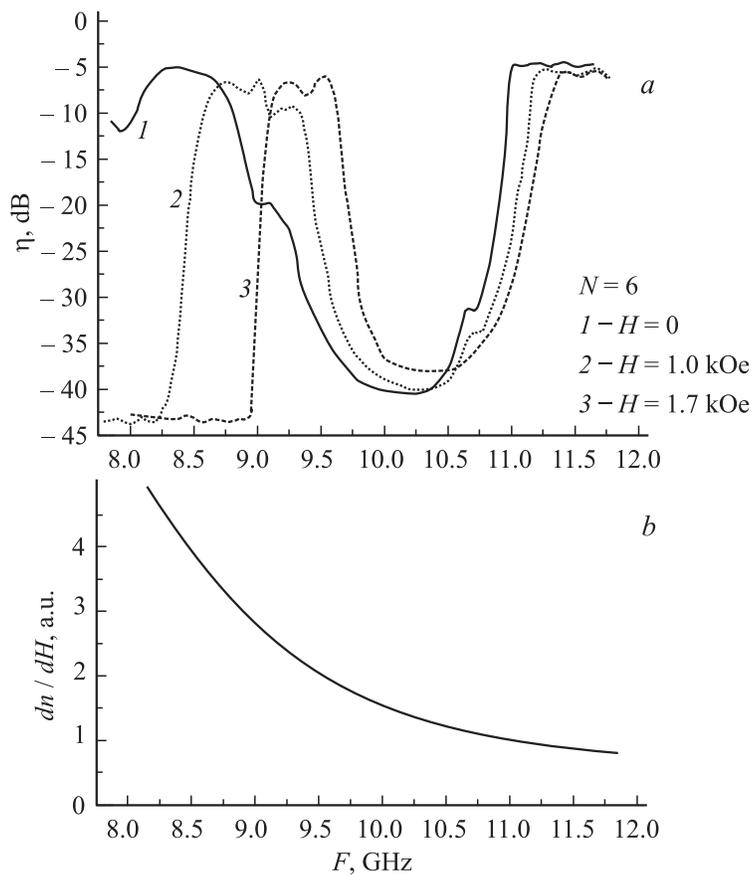


Рис. 2. К пояснению различных темпов сдвига амплитудно-частотных характеристик фильтра во внешнем поле.

распределение индуктивного импеданса в волноводе. Расположение полоски в центре волновода обусловлено использованием моды TE_{10} и обеспечивает совпадение максимумов электрического поля волны в волноводе с максимумами импеданса, что позволяет электромагнитному полю максимально концентрироваться в феррите. Использование такой металлизации сокращает потери на отражение по сравнению с

дисками большего диаметра, а также существенно упрощает технологию изготовления фильтра, особенно в случае необходимости процесса травления.

На рис. 2, *a* показаны результаты перестройки АЧХ-фильтра, состоящего из 6 слоев алюминиевой полоски шириной 0.5 mm, напыленной на пластинку поликора такой же ширины. Металл при этом располагался между ферритовой пластиной и поликором. Как видно из рис. 2, *a*, высокочастотный (ВЧ) и низкочастотный (НЧ) участки АЧХ сдвигаются с различными скоростями при изменении магнитного поля. Это объясняется характерным видом дисперсии магнитной восприимчивости χ для ЖИГ (см., например, [8]). С возрастанием поля действительная часть магнитной восприимчивости χ' возрастает на заданной частоте. Это приводит, в свою очередь, к росту концентрации поля в феррите. При этом в первом приближении можно рассчитать сдвиг АЧХ во внешнем поле, пользуясь понятием оптического пути в среде с показателем преломления

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}. \quad (2)$$

Его изменение в магнитном поле H определяет сдвиг амплитудно-частотных характеристик:

$$\frac{\partial n}{\partial H} \sim \frac{1}{\sqrt{\mu}} \frac{\partial \mu}{\partial H} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi\chi'}} \frac{\partial \chi'}{\partial H}. \quad (3)$$

На рис. 2, *b* в том же масштабе по шкале частот представлен расчет сдвига АЧХ согласно (3). Скорость сдвига АЧХ нормирована на скорость ВЧ-фронта зоны заграждения (рис. 2, *a*), т. е. на значение при частоте 11.2 GHz. Сравнивая величины скоростей сдвига ВЧ- и НЧ-фронтов визуально, можно убедиться в хорошем совпадении экспериментальных и расчетных результатов (левый фронт РВГ перемещается примерно вдвое быстрее правого при значениях магнитного поля вблизи 1 kOe). Абсолютный сдвиг составляет в среднем 250 MHz для НЧ-фронта и 125 MHz для ВЧ-фронта РВГ.

В целом, как следует из рис. 2, *a*, при помощи внешнего магнитного поля для РВГ-фильтра возможно формирование довольно узкой полосы пропускания (порядка 0.5 GHz) при потерях не более 6 dB и запираении порядка 40–43 dB. Эта полоса может эффективно перестраиваться в диапазоне магнитного поля от 0 до 2.5 kOe.

III. Заключение. В ходе экспериментов продемонстрирована возможность управления амплитудно-частотными характеристиками СВЧ-фильтров, созданных на основе металлизированных PBG-структур. Предложен модифицированный вариант таких структур, который может существенно упростить изготовление фильтров, например в миллиметровом диапазоне длин волн. Характеристики и возможность перестройки амплитудно-частотных характеристик принципиально не отличаются для всех рассмотренных типов металлизированных шаблонов. Попытка объяснить механизм перестройки таких PBG-структур показала, что характерные сдвиги АЧХ во внешнем магнитном поле могут быть объяснены дисперсионными свойствами ферритов, используемых в эксперименте.

Список литературы

- [1] *Yablonovitch E.* // J. Opt. Soc. Am. B. 1993. V. 10. P. 283–295.
- [2] *Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopolos N.G.* // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 2001. V. 49. N 2. P. 297–306.
- [3] *Figotin A., Godin Yu.A., Vitebsky I.* // Phys. Rev. B. 1998. V. 57. P. 2841–2848.
- [4] *Голубев В.Г., Кособукин В.А.* и др. // ФТП. 2001. Т. 35. В. 6. С. 710–713.
- [5] *Голубев В.Г., Курдюков Д.А., Певцов А.В.* и др. // ФТП. 2002. Т. 36. В. 9. С. 1122–1127.
- [6] *Busch K., John S.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. N 5. P. 967–970.
- [7] *Kang D., MacLennan J.E., Clark N.A.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. N 18. P. 4052–4055.
- [8] *Yoshino K., Shimoda Y., Kawagishi Y.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. N 7. P. 932–934.
- [9] *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.