

05;12

## **Перестраиваемые терагерцовые метаматериалы с использованием электрически управляемых пьезоэлектрических актюаторов**

© И.В. Мунина, В.М. Тургалиев, И.Б. Вендик

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
им. В.И. Ульянова (Ленина) „ЛЭТИ“  
E-mail: MWLab@mwlab.spb.ru

Поступило в Редакцию 10 ноября 2011 г.

Предложена новая концепция перестраиваемых метаматериалов терагерцового диапазона с электрически управляемыми характеристиками. Разработаны варианты реализации перестраиваемых метаматериалов с использованием управляемых элементов в виде пьезоэлектрических актюаторов. Предложены конфигурации перестраиваемых метаматериалов, представляющие собой планарные металло-диэлектрические структуры в виде массива  $U$ -образных резонаторов и массива квадратных металлических пластин, в состав которых входят пьезоэлектрические актюаторы.

В последнее время активно исследуется возможность разработки и использования устройств терагерцового (ТГц) частотного диапазона, в частности в медицине и системах безопасности. Это обусловлено хорошей проникающей способностью ТГц-излучения в биологические объекты и безопасностью этого излучения для здоровья человека. При разработке функциональных устройств ТГц-диапазона могут быть использованы искусственные материалы, известные как электромагнитные метаматериалы. Этот класс искусственных композитных материалов характеризуется необычными электромагнитными свойствами, такими как отрицательная магнитная и/или диэлектрическая проницаемость, отрицательный коэффициент преломления. Управление этими свойствами позволяет разрабатывать ТГц-устройства с перестраиваемыми техническими характеристиками: рабочая частота, вносимое затухание, знак и величина эффективных электромагнитных параметров.

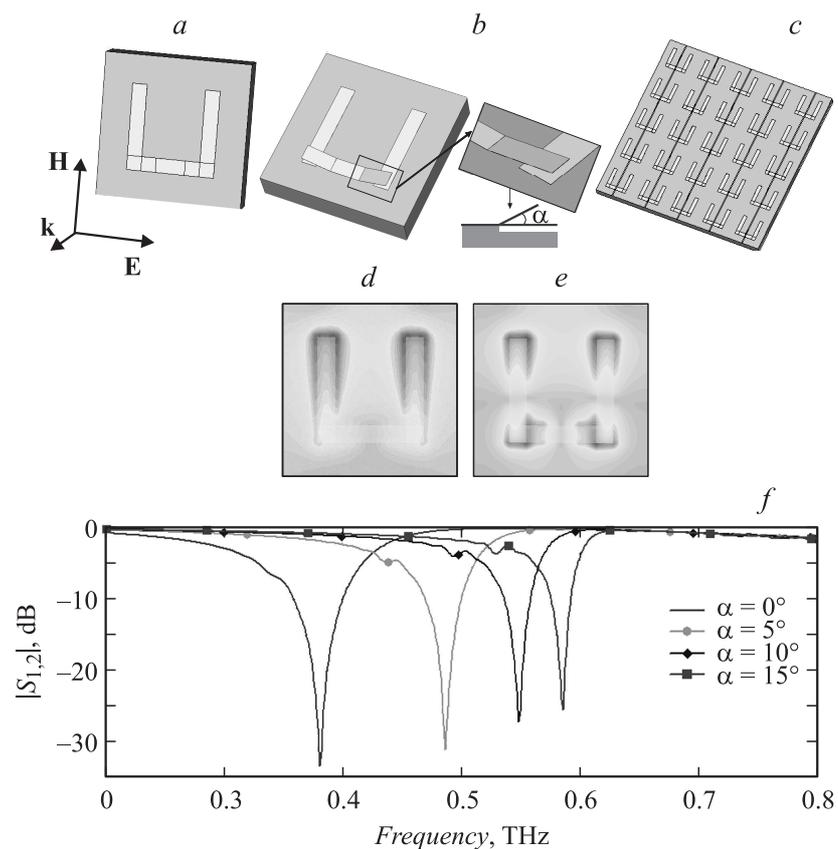
Управление может осуществляться за счет включения в состав метаматериалов сегнетоэлектриков [1], полупроводников [2], жидких

кристаллов [3]. Перспективным также является применение микро-электромеханических систем для эффективного управления свойствами метаматериалов в ТГц-диапазоне [4].

Одним из наиболее распространенных видов метаматериалов являются метаматериалы с использованием кольцевого разомкнутого резонатора (КРР). В [5,6] были представлены различные модификации метаматериала на основе КРР. Перестраиваемые метаматериалы с использованием КРР реализуются в основном за счет управления емкостью или проводимостью в области разрыва кольца [1–4].

Одной из модификаций КРР является  $U$ -образный резонатор [7]. Он представляет собой полуволновый резонатор, состоящий из трех металлических частей, две из которых расположены перпендикулярно к третьей в виде буквы  $U$  (рис. 1,  $a$ ). Размеры резонатора и диэлектрическая проницаемость подложки определяют возможность его использования в соответствующем частотном диапазоне. При работе в субтерагерцовом диапазоне (0.1–0.9 THz) длина резонатора порядка  $100 \mu\text{m}$ . Для моделирования свойств  $U$ -образного резонатора выбраны длина и ширина горизонтального и вертикальных металлических отрезков 120 и  $20 \mu\text{m}$  соответственно. Толщина и диэлектрическая проницаемость подложки  $h = 40 \mu\text{m}$  и  $\epsilon_r = 2.5$  соответственно. Ориентация электрической и магнитной компонент падающей электромагнитной волны относительно предложенной структуры изображена на рис. 1,  $a$ . Максимум электрического поля расположен на открытых концах резонатора (рис. 1,  $d$ ). Резонансная частота первой моды составляет 0.384 THz. Перестройка резонансной частоты может осуществляться за счет введения в состав структуры управляемых актюаторов с использованием пьезоэлектрических материалов (рис. 1,  $b$ ) [8]. Перестраиваемые пьезоэлектрические актюаторы обычно применяются в микроволновом диапазоне длин волн [9], но могут быть легко масштабированы для применения в ТГц-диапазоне благодаря использованию современных процессов микротехнологии.

При изменении напряжения или температуры происходит отгибание актюатора на некоторый угол  $\alpha$ . В образовавшемся зазоре увеличивается концентрация электрического поля (рис. 1,  $e$ ), возникает перестраиваемая емкость, изменяющая электрическую длину резонатора. Это, в свою очередь, ведет к сдвигу резонансной частоты. Для обеспечения электрического управления актюаторами используются металлические линии, подводящие напряжение смещения. Выполнено



**Рис. 1.**  $U$ -образный резонатор (a), при отогнутом актюаторе на угол  $\alpha$  (b), распределение электрического поля в структуре на резонансных частотах для состояний  $\alpha = 0^\circ$  (c) и  $\alpha = 15^\circ$  (d). Массив  $U$ -образных резонаторов (e) и частотная зависимость коэффициента передачи массива при различных значениях угла отклонения  $\alpha(f)$ .

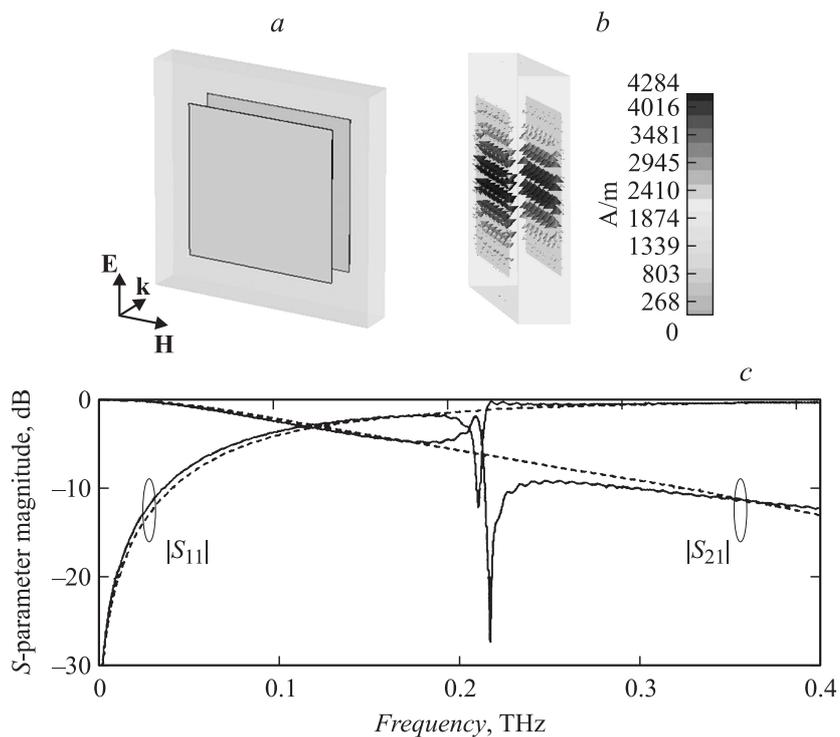
численное электродинамическое моделирование массива  $U$ -образных резонаторов, нанесенных на диэлектрическое основание (рис. 1, c). При изменении угла  $\alpha$  от  $0$  до  $15^\circ$  резонансная частота изменяется от  $0.384$  до  $0.586$  THz (рис. 1, f). Разработанный метаматериал может

быть использован как перестраиваемый полосно-заграждающий фильтр в ТГц-диапазоне частот. Преимуществами такой структуры являются высокое быстродействие и эффективность перестройки по частоте.

Другим видом метаматериала является структура металл–диэлектрик–металл (МДМ) [10,11], состоящая из квадратных металлических пластин, расположенных с двух сторон диэлектрической подложки (рис. 2, *a*). Между двумя металлическими поверхностями структуры возникает емкость, при этом на каждой из поверхностей возбуждаются токи в противофазе, что приводит к резонансному магнитному отклику [11]. Распределение поверхностных токов в ячейках связанных квадратных пластин на частоте магнитного резонанса показано на рис. 2, *b*. Если убрать одну из металлических пластин, то резонансный отклик в этом частотном диапазоне исчезает. Амплитудно-частотные характеристики для случая одной пластины и связанной пары представлены на рис. 2, *c*.

Резонансная частота структуры МДМ на основе квадратных металлических пластин зависит от величины емкости между ними. Отгибая часть металлизации пластины от подложки, можно изменить расстояние между пластинами и соответственно изменить емкость, благодаря чему резонансная частота структуры изменится. Чем больше угол между отогнутой частью металлизации и подложкой, тем меньше емкость и выше резонансная частота.

Анализировалась структура МДМ, состоящая из массива квадратных металлических пластин с пьезоэлектрическими актюаторами (рис. 2, *d*). Поперечное сечение структуры МДМ с пьезоэлектрическим актюатором, аналогичным экспериментально исследованному в [12], показано на рис. 2, *e*. Для того чтобы обеспечить отгибание части актюатора от подложки, необходимо удалить под ним слой кремния. Для большей эластичности актюатора используется мембрана, в качестве которой выступает оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Подвижная часть актюатора отгибается за счет сил внутреннего сжатия пьезоэлектрика под действием приложенного напряжения. Все пьезоэлектрические актюаторы расположены на одной стороне подложки и соединены шинами питания для управления величиной изгиба. Шины питания ориентированы параллельно магнитной компоненте электромагнитного поля для того, чтобы исключить взаимодействие с ними ТГц-излучения. Толщина металлизации составляет 200 nm. В качестве подложки выбран высокоомный кремний толщиной  $d = 20 \mu\text{m}$  с диэлектрической проницаемостью



**Рис. 2.** Структура МДМ на основе связанных металлических пластин: элементарная ячейка (*a*), распределение поверхностных токов на резонансной частоте ячейки (*b*), частотная зависимость коэффициентов передачи и отражения для ячейки структуры с одной пластиной (пунктирные линии) и связанной пары (сплошные) (*c*), массив из четырех ячеек с пьезоэлектрическими актюаторами и линиями питания (*d*), поперечное сечение структуры с пьезоэлектрическим актюатором (*e*), частотная зависимость коэффициента передачи массива при разных углах изгиба актюатора  $\alpha$  (*f*).

$\varepsilon_d = 12$  и тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg}(\delta) = 0.001$ . Размер квадратных пластин  $w$  составляет  $200 \mu\text{m}$  при расстоянии между ними  $100 \mu\text{m}$ . Ширина шин питания составляет  $20 \mu\text{m}$ . Частотная зависимость коэффициентов передачи для разных углов отклонения, полученная в результате электродинамического моделирования, представлена на

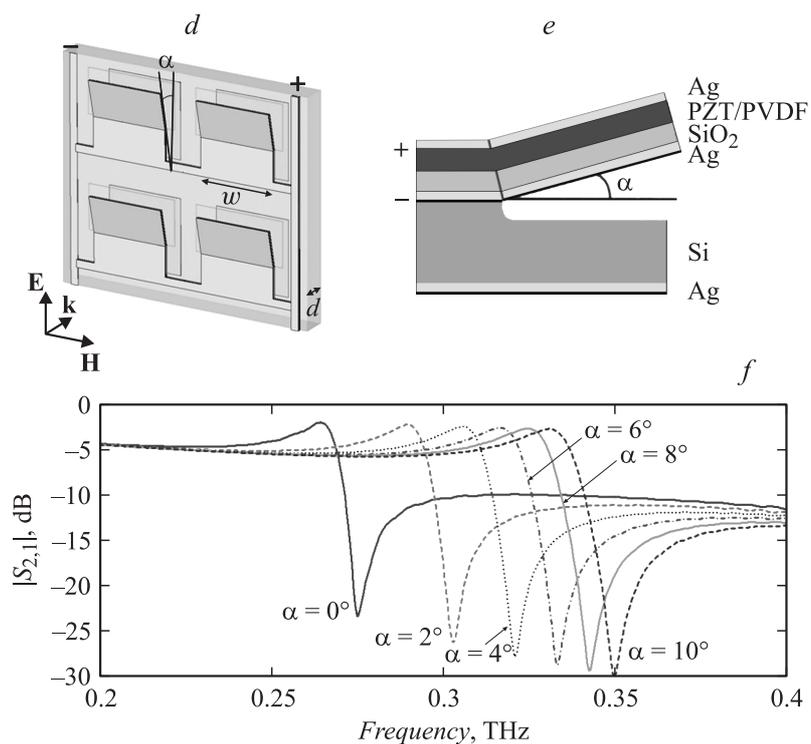


Рис. 2 (продолжение).

рис. 2, *f*. Амплитудно-частотная характеристика такой структуры соответствует фильтру нижних частот с перестраиваемой частотой отсечки. При отгибании пьезоэлектрического актюатора от плоскости подложки на угол  $\alpha$  от  $0$  до  $10^\circ$  относительная перестройка частоты отсечки составляет 24%.

В качестве пьезоэлектрика в составе актюатора предлагается использовать цирконат-титанат свинца PZT ( $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ) или поливинил-иденфторид PVDF ( $\text{CF}_2-\text{CH}_2$ )<sub>*n*</sub> в  $\beta$ -форме. Использование кристаллического полимера PVDF в качестве пьезоэлектрика, обладающего эластичными свойствами, позволяет исключить слой мембраны из

структуры актюатора. Образцы актюаторов на основе предложенных пьезоэлектриков экспериментально исследованы в [8,12 и 13].

Эффективность пьезоэлектрического актюатора может быть повышена при использовании двух пьезоэлектрических слоев, пьезоэлектрические постоянные которых имеют разные знаки. При этом изгиб осуществляется за счет процессов как сжатия, так и растяжения. Величина изгиба актюатора может быть дополнительно увеличена за счет увеличения длины подвижной части или уменьшения толщины актюатора.

## Список литературы

- [1] *Gil M., Damm C., Giere A.* et al. // *Electronics Letters*. 2009. V. 45. N 8. P. 417.
- [2] *Shen N.-H., Kafesaki M., Koschny T.* et al. // *Physical Review. B*. 2009. V. 79. P. 161 102.
- [3] *Zhao Q., Kang L., Du B.* et al. // *Applied Physical Letters*. 2007. V. 90. P. 011 112.
- [4] *Zhu W.M., Cai H., Mei T.* et al. // *IEEE International Conf. Microelectromechanical Systems (MEMS)*. 2010. Wanchai, Hong Kong, 24–28 January 2010. P. 196–199.
- [5] *Tao H., Landy N.I., Fan K.* et al. // *IEEE International Electron Devices Meeting*. 2008. (IEDM 2008). San Francisco, CA, USA. 15–17 December 2008. P. 1–4.
- [6] *Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C.* et al. // *Physical Review Letters*. 2000. V. 84. P. 4184–4187.
- [7] *Xiong X., Sun W.H., Bao Y.J.* et al. // *Physical Review. B*. 2010. V. 81. P. 075 119.
- [8] *Atkinson G.M., Pearson R.E., Ounaies Z.* et al. // *Proc. of the 12th Int. Conf. on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems*. June 2003, Boston. P. 8–12.
- [9] *Al-Ahmad M., Plana R.* // *Proc. of the 37th EuMC*. October 2007. Munich, Germany. P. 294–297.
- [10] *Han J., Lu X.* et al. // *Optics Express*. 2009. V. 17. N 19. P. 16 527–16 534.
- [11] *Alici K.B., Ozbay E.* // *Photonics and nanostructures: Fundamentals and Applications*. April 2008. V. 6. N 1. P. 102–107.
- [12] *Jeon Y.B., Sood R., Jeong J.-H., Kim S.-G.* // *Sensors and Actuators. A*. 2005. V. 122. P. 16–22.
- [13] *Lee C.S., Joo J., Han S.* et al. // *Journal Korean Physical Society*. 2004. V. 45. N 3. P. 747–750.