

## Нелинейный сверхвысокочастотный фазовращатель на электромагнитно-спиновых волнах

© А.Б. Устинов,<sup>1</sup> Б.А. Калиникос,<sup>1</sup> G. Srinivasan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, 197376 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Oakland University, 48309 Rochester, Michigan, USA  
e-mail: ustinov-rus@mail.ru

(Поступило в Редакцию 19 февраля 2014 г.)

Экспериментально исследован нелинейный сверхвысокочастотный фазовращатель, изготовленный на основе мультиферроидной структуры, состоящей из слоев железо-иттриевого граната и титаната бария-стронция. Структура является волноводом для нелинейных электромагнитно-спиновых волн. Продемонстрировано тройное управление фазовым набегом электромагнитно-спиновых волн, а именно за счет изменения мощности входного СВЧ сигнала, поля подмагничивания структуры и электрического поля смещения.

В последние годы наблюдается устойчивый интерес к исследованию новых композитных материалов как для низкочастотной, так и для сверхвысокочастотной (СВЧ) микроэлектроники. В частности, значительное внимание уделяется изучению искусственных мультиферроиков [1]. По сравнению с природными мультиферроиками [2] искусственные мультиферроики [1] демонстрируют гораздо более сильный магнитоэлектрический эффект. Этот эффект лежит в основе разработки двух новых классов линейных устройств обработки СВЧ-сигналов, таких как фильтры, линии задержки и фазовращатели.

К первому классу относятся устройства, изготовленные на основе феррит-пьезоэлектрических мультиферроидных структур. В таких структурах магнитоэлектрический эффект обусловлен комбинацией пьезоэлектрического и магнитострикционного эффектов, которые вызывают механическую деформацию мультиферроидной структуры при приложении к ней электрического или магнитного поля [3,4]. Второй класс устройств изготавливается на основе феррит-сегнетоэлектрических структур. В основе магнитоэлектрического эффекта в таких структурах лежит электродинамическое взаимодействие спиновых и электромагнитных волн [5–8].

Несмотря на то что исследование слоистых мультиферроидных структур началось давно, нелинейные колебательные и волновые процессы в них остаются малоизученными. Так, в работе [9] был впервые изучен нелинейный отклик мультиферроидного резонатора, изготовленного на структуре феррит-пьезоэлектрик. В работе [10] было теоретически исследовано формирование солитонов огибающей электромагнитно-спиновых волн (ЭСВ) в структуре феррит-сегнетоэлектрик с учетом как магнитной, так и электрической волновых нелинейностей структуры.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование нелинейного СВЧ-фазовращателя, построенного на слоистой структуре феррит-сегнето-

электрик. Нелинейным эффектом, лежащим в основе принципа действия описываемого ниже СВЧ-фазовращателя, является нелинейный фазовый сдвиг ЭСВ, который проявляется как зависимость фазы прошедшего фазовращателя СВЧ-сигнала от его входной мощности. Другим полезным эффектом в функционировании устройства является зависимость фазового набега СВЧ-сигнала от электрического и магнитного полей смещения, прикладываемых к мультиферроидной структуре [7].

Экспериментальная структура имела два слоя (рис. 1). Слой феррита был вырезан из пленки монокристаллического железо-иттриевого граната  $Y_3Fe_5O_{12}$  (YIG) (1) толщиной  $5.7\ \mu m$ , эпитаксиально выращенной на подложке галлий-гадолиниевого граната (2) толщиной  $500\ \mu m$ . Длина и ширина образца пленки YIG были соответственно 4 и 2 мм. Для того чтобы получить гладкую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) фазовращателя, была выбрана пленка со свободными поверхностными спинами.

Сегнетоэлектрический слой был выполнен в виде пластины керамического титаната бария-стронция состава  $Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$  (BST) (3) толщиной  $500\ \mu m$ . Размеры пластины в ее плоскости составляли  $5 \times 8$  мм. При комнатной температуре образец BST находился в параэлектрической фазе и демонстрировал изотропную диэлектрическую проницаемость. Чтобы приложить электрическое напряжение, на верхнюю и нижнюю поверхности пластины BST методом вакуумного испаре-

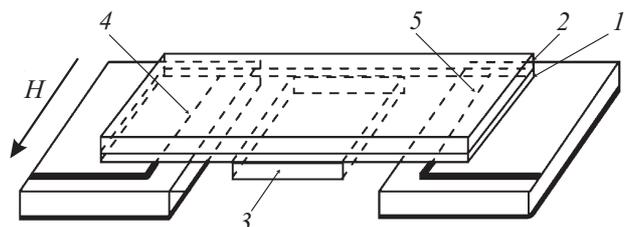


Рис. 1. Схема нелинейного фазовращателя.

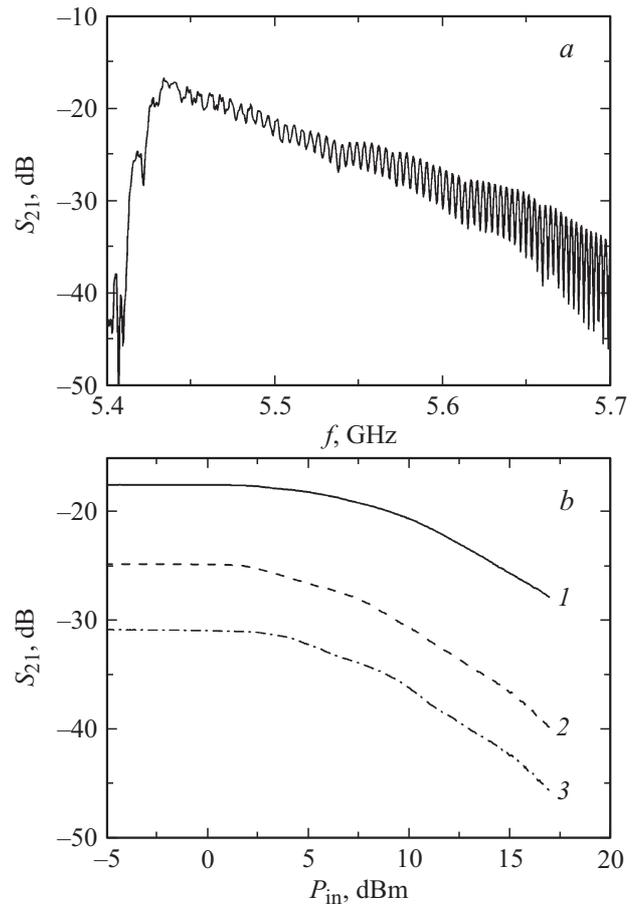
ния наносились хромовые электроды толщиной 50 nm. Толщина электродов была намного меньше, чем глубина скин-слоя на рабочих частотах фазовращателя, и, следовательно, электроды были „прозрачными“ для СВЧ электромагнитного поля.

В нелинейном фазовращателе использовались входная (4) и выходная (5) микрополосковые антенны шириной 50 μm и длиной 2 mm (рис. 1). Расстояние между антеннами было 8 mm. Они питались от микрополосковых линий передачи СВЧ-сигнала с волновым сопротивлением 50 Ω. Пленка YIG располагалась над антеннами в непосредственном контакте с ними и фиксировалась. Пластина BST прижималась снизу к поверхности пленки YIG. Длина композитной области YIG–BST была равна 5 mm. К электродам пластины BST прикладывалось напряжение величиной от нуля до 1000 V. Таким образом, в пластине создавалось электрическое поле смещения  $E = 0–20$  kV/cm. Устройство размещалось между полюсами электромагнита. Магнитное поле смещения величиной  $H = 1100–1400$  Oe прикладывалось в плоскости пленки YIG параллельно антеннам.

Рассмотрим принцип работы устройства. Поверхностная спиновая волна (СВ) возбуждается в пленке YIG входной микрополосковой антенной. По мере распространения от входной антенны СВ вначале попадает в область, где пленка YIG находится в контакте с пластиной BST. На границе этой области СВ превращается в ЭСВ, которая затем распространяется в структуре YIG–BST. Пройдя область мультиферроика, ЭСВ опять преобразуется в СВ. После этого спиновая волна принимается выходной микрополосковой антенной.

Описываемое устройство демонстрирует тройное управление фазовым набегом благодаря переносу СВЧ-сигнала на части пути его распространения электромагнитно-спиновыми волнами. Подчеркнем, что фазовый сдвиг несущей ЭСВ управляется в нелинейном фазовращателе не только под действием электрического  $E$  и магнитного полей  $H$  смещения, прикладываемых к волноведущей структуре, но также и при изменении уровня мощности входного СВЧ-сигнала  $P_{in}$ . При этом электрическое поле  $E$  индуцирует фазовый сдвиг за счет уменьшения диэлектрической проницаемости BST, которая определяет дисперсию ЭСВ [5]. Нелинейный фазовый сдвиг появляется с увеличением СВЧ-мощности из-за развития процессов четырехволнового параметрического взаимодействия ЭСВ, аналогичных тем, которые развиваются для спиновых волн в пленках YIG [11,12].

В экспериментах измерялись  $S$ -параметры СВЧ-фазовращателя в зависимости от частоты  $f$ , а также в зависимости от входной СВЧ мощности  $P_{in}$  при различных значениях  $H$  и  $E$ . Мощность  $P_{in}$  варьировалась в диапазоне от  $-10$  до  $17$  dBm. На рис. 2, *a* показана типичная экспериментальная АЧХ нелинейного фазовращателя, измеренная для магнитного поля  $H = 1190$  Oe и  $P_{in} = -10$  dBm. Очевидно, что полоса пропускания устройства лежит в диапазоне  $5.42–5.7$  GHz. При такой

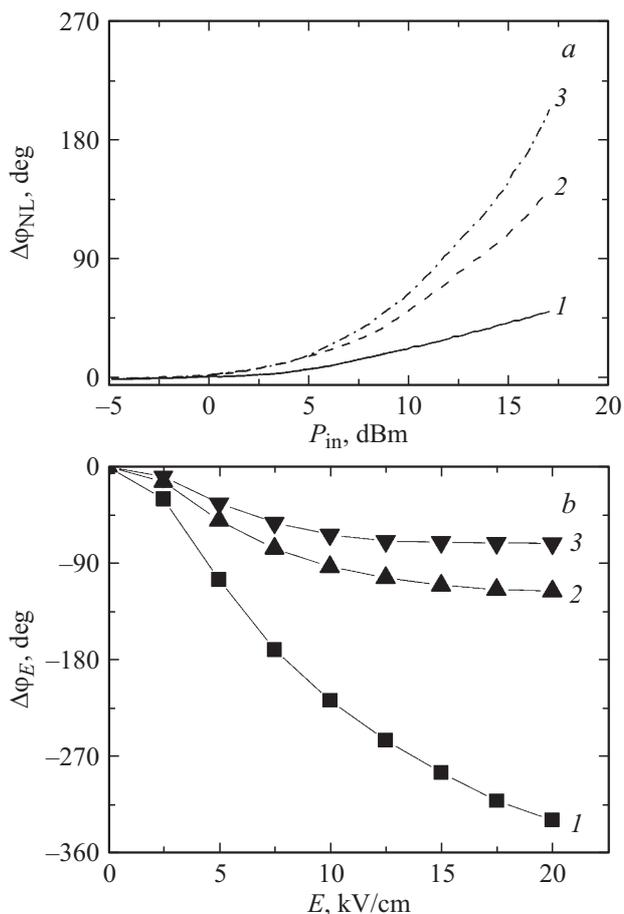


**Рис. 2.** Амплитудно-частотная характеристика фазовращателя (*a*) и зависимости вносимых потерь от входной СВЧ-мощности нелинейного фазовращателя (*b*), измеренные при  $H = 1190$  Oe. Кривые 1, 2 и 3 измерены соответственно на частотах 5.437, 5.570 и 5.633 GHz.

входной мощности ЭСВ распространяются в линейном режиме во всем диапазоне рабочих частот.

При увеличении мощности  $P_{in}$  возрастают вносимые потери, в то время как изменение обратных потерь остается пренебрежимо малым. На рис. 2, *b* показаны зависимости вносимых потерь от мощности  $P_{in}$ , измеренные на ряде частот, лежащих в полосе пропускания устройства. Из рисунка видно, что при превышении пороговой мощности  $P_{th}$ , величина которой составляет около 2 dBm, вносимые потери увеличиваются на  $\Delta S_{21} = 10–15$  dB с увеличением  $P_{in}$  до 17 dBm. Такое поведение вносимых потерь объясняется нелинейным затуханием ЭСВ, которое определяется в основном четырехволновыми процессами рассеяния с большой передачей волнового числа в пленке YIG.

Рис. 3 показывает типичные характеристики перестройки фазы феррит-сегнетоэлектрического нелинейного фазовращателя, измеренные для  $H = 1190$  Oe. Графики нелинейного сдвига фазы  $\Delta\phi_{NL}$  от входной мощности  $P_{in}$ , изображенные на рис. 3, *a*, демонстрируют сильную зависимость от несущей частоты ЭСВ и, следовательно,



**Рис. 3.** Изменение фазового набег от уровня входной СВЧ-мощности (а) и от приложенного электрического напряжения (б). Обозначения те же, что и на рис. 2.

от ее волнового числа. Наибольший измеренный нелинейный сдвиг фазы составил  $203^\circ$  на частоте 5.633 GHz при  $P_{in} = 17$  dBm. Наблюдаемые изменения характеристики  $\Delta\varphi_{NL}(P_{in})$  можно объяснить доминированием спин-волновой компоненты в ЭСВ при относительно больших значениях несущих волновых чисел.

Дифференциальный фазовый сдвиг  $\Delta\varphi_E$ , возникающий при приложении электрического поля  $E$ , показан на рис. 3, б. Приводимые данные показывают значительное снижение  $\Delta\varphi_E$  с увеличением рабочей частоты (а также и волновых чисел) ЭСВ в пределах диапазона рабочих частот устройства. Этот эффект связан с уменьшением электромагнитного взаимодействия спиновых и электромагнитных волн в структуре YIG-BST при больших значениях волновых чисел [5]. Таким образом,  $\Delta\varphi_{NL}$  и  $\Delta\varphi_E$  являются конкурирующими характеристиками для исследуемого типа ЭСВ.

Аналогичные измерения были выполнены при различных значениях  $H$ . Измерения с небольшим изменением  $H$  продемонстрировали магнитное управление фазовым набегом ЭСВ. Так, например, изменение  $H$  на 10 Oe обеспечивало изменение фазы  $\Delta\varphi_M$  более, чем

на  $180^\circ$ . Сравнительно большое изменение  $H$  изменяло рабочий диапазон частот фазовращателя.

В заключение отметим, что из проведенного исследования следует, что нелинейный фазовращатель, построенный на искусственной планарной мультиферроидной структуре YIG-BST, обеспечивает тройное управление фазовым набегом СВЧ-сигнала. Это управление реализуется за счет вариации мощности входного СВЧ сигнала, а также за счет изменения электрического и магнитного полей смещения. Таким образом, исследуемое устройство может найти различные области применения. В качестве примера можно назвать устройства магнотонной логики [13,14].

### Список литературы

- [1] Sun N. X., Srinivasan G. // Spin. 2012. Vol. 2. N 3. P. 1240004/1–46.
- [2] Пятаков А.П., Звездин А.К. // УФН. 2012. Т. 182. Вып. 6. С. 593–620.
- [3] Shastry S., Srinivasan G., Bichurin M.I., Petrov V.M., Tatarenko A.S. // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70. N 6. P. 064416/1–6.
- [4] Ustinov A.B., Srinivasan G., Fetisov Y.K. // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103. N 6. P. 063901/1–6.
- [5] Demidov V.E., Kalinikos B.A., Edenhofer P. // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. N 12. P. 10007–10016.
- [6] Ustinov A.B., Tiberkevich V.S., Srinivasan G. et al. // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. N 9. P. 093905/1–7.
- [7] Ustinov A.B., Srinivasan G., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. N 3. P. 031913/1–3.
- [8] Livesey K.L., Stamps R.L. // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81. N 9. P. 094405/1–9.
- [9] Устинов А.Б., Фетисов Ю.К., Лебедев С.В., Srinivasan G. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 4. С. 41–47.
- [10] Черкасский М.А., Калиникос Б.А. // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. Вып. 11. С. 707–711.
- [11] Ustinov A.B., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. N 17. P. 172511/1–3.
- [12] Hansen U.-H., Demidov V.E., Demokritov S.O. // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. N 25. P. 252502/1–3.
- [13] Schneider T., Serga A.A., Leven B., Hillebrands B., Stamps R.L., Kostylev M.P. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. N 2. P. 022505/1–3.
- [14] Khitun A., Wang K.L. // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110. N 3. P. 034306/1–11.