

06;12

## Феррит-сегнетоэлектрические фазовращатели с совместным электрическим и магнитным управлением

© А.Б. Устинов,<sup>1</sup> П.И. Колков,<sup>1</sup> А.А. Никитин,<sup>1</sup> Б.А. Калиникос,<sup>1</sup> Ю.К. Фетисов,<sup>2</sup> G. Srinivasan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,  
197376 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: ustinov-rus@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет),  
119454 Москва, Россия

<sup>3</sup> Oakland University, Rochester,  
48309 Michigan, USA

(Поступило в Редакцию 16 ноября 2010 г.)

Экспериментально исследованы планарные фазовращатели, изготовленные на основе слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик. Структуры служили волноводами для электромагнитно-спиновых волн, фазовый набег которых регулировался как электрическим, так и магнитным полями. Измерения проведены в диапазоне магнитных полей 900–2100 Ое, что соответствует рабочим частотам 4–8.5 GHz, для ферритовых пленок железо-иттриевого граната толщиной 5–20 мкм и для сегнетоэлектрических пластин титаната бария стронция толщиной 200 и 500 мкм. Показано, что фазовый набег достигает значений более 180 deg и является функцией магнитного и электрического полей, а также толщины ферритового и сегнетоэлектрического слоев.

### Введение

Сверхвысокочастотные (СВЧ) фазовращатели широко применяются в фазированных антенных решетках и других радиолокационных и телекоммуникационных системах [1] в качестве электрически управляемых элементов. Традиционными материалами для таких фазовращателей являются полупроводники, сегнетоэлектрики и ферриты. В последние годы были разработаны новые конструкции фазовращателей. Обзор современных СВЧ фазовращателей показывает, что их можно классифицировать согласно механизму управления: электрически управляемые [2–4], микроэлектромеханически регулируемые [5] и магнито-управляемые [6,7]. Электрически управляемые фазовращатели на основе сегнетоэлектрических материалов представляют интерес из-за высокой скорости перестройки фазы СВЧ сигнала и низкой потребляемой электрической мощности. Преимуществами магнито-управляемых ферритовых пленочных фазовращателей являются широкий диапазон перестройки их рабочих частот ( $\sim 0.5$ –50) GHz и сравнительно низкие вносимые потери.

Одним из методов реализации новых механизмов регулировки характеристик фазовращателей является формирование волноводных гибридных слоистых структур из ферритовых и сегнетоэлектрических материалов. Такой метод обеспечивает совместную электрическую и магнитную регулировку рабочей частоты фазовращателя и фазового набега СВЧ сигнала в нем. Поэтому интеграция ферритовых и сегнетоэлектрических материалов привела к созданию нового класса СВЧ приборов с совместной электрической и магнитной перестройкой (см. например, [8–10]).

К настоящему времени предложены различные конструкции СВЧ фазовращателей на основе феррит-сег-

нетоэлектрических слоистых структур. Так, в работах [11,12] описывается фазовращатель в форме копланарного волновода, сформированного на поверхности двуслойной пленочной феррит-сегнетоэлектрической структуры. В работах [13,14] описывается фазовращатель, использующий сравнительно тонкую пленку феррита и сравнительно толстую пластину сегнетоэлектрика в виде двуслойной структуры, служившей волноводом для электромагнитно-спиновых волн. Вместе с тем к настоящему времени функциональные возможности таких приборов изучены явно недостаточно.

Настоящая работа посвящена подробному экспериментальному исследованию феррит-сегнетоэлектрических планарных фазовращателей, принцип работы которых основан на распространении электромагнитно-спиновых волн.

### 1. Конструкция фазовращателей и методика измерений

Экспериментальный макет фазовращателя имел конструкцию, показанную на рис. 1. Слоистая структура состояла из пленки железо-иттриевого граната  $Y_3Fe_5O_{12}$  (YIG) (1) и пластины титаната бария-стронция (2). Пленка YIG была эпитаксиально выращена на подложке

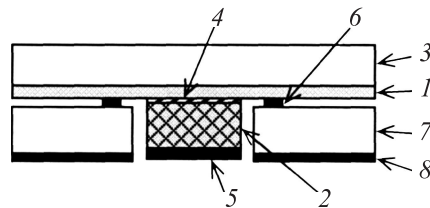


Рис. 1. Схема феррит-сегнетоэлектрического фазовращателя.

галлий-гадолиниевого граната  $Ga_3Gd_5O_{12}$  (GGG) (3). В экспериментах использовались пленки YIG толщиной 5,2, 9,6 и 18  $\mu\text{m}$ . Ширина пленок составляла 2 mm, длина — 4 cm, намагниченность насыщения — 1750 Oe. Пленки YIG имели ширину кривой ферромагнитного резонанса 0,4–0,6 Oe на частоте около 5,5 GHz. Измерение ширины кривой ферромагнитного резонанса, а также контроль качества пленок осуществлялись методом „магнитной ямы“ [15].

Пластины сегнетоэлектрика толщиной 200 и 500  $\mu\text{m}$  были изготовлены из керамики состава  $Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$  (BST). Их размеры в плоскости были  $5 \times 10$  mm. Керамика находилась в параэлектрической фазе. Она имела изотропную диэлектрическую проницаемость при комнатной температуре. На обе стороны пластин были напылены электроды для приложения электрического напряжения. Верхний электрод (4) представлял собой слой хрома толщиной около 50 nm. Такая толщина была много меньше толщины скин-слоя для СВЧ электромагнитного поля рабочей частоты. Это обуславливало возможность гибридизации мод электромагнитных волн в сегнетоэлектрике и магнитоэлектрических спиновых волн в феррите. Нижний электрод (5) представлял собой слой меди толщиной 5  $\mu\text{m}$ .

Для определения свойств керамики непосредственно в диапазоне СВЧ из пластины BST толщиной 500  $\mu\text{m}$  был изготовлен прямоугольный резонатор с размерами в плоскости  $1 \times 1$  mm. Измерения проводились для резонансного колебания низшего типа, которое наблюдалось на частоте около 5,5 GHz. Результаты показали, что изменение прикладываемого электрического напряжения от нуля до 1000 V приводило к уменьшению относительной диэлектрической проницаемости от 2400 до 1900 по закону, близкому к квадратичному. Тангенс угла диэлектрических потерь составлял около  $10^{-2}$ .

Возбуждение и прием электромагнитно-спиновых волн в фазовращателе осуществлялось микрополосковыми антеннами (6) длиной 2 mm и шириной 50  $\mu\text{m}$ , сформированными на подложке из поликора (7) толщиной 0,5 mm, металлизированной с обратной стороны (8). Расстояние между антеннами было 6,7 mm. Подвод СВЧ мощности к антеннам осуществлялся при помощи микрополосковых линий с волновым сопротивлением 50  $\Omega$ . Пленка YIG помещалась на антенны спиновых волн и фиксировалась. Снизу к ней прижималась пластина BST. Длина зоны контакта YIG и BST была 5 mm. Макет фазовращателя помещался в постоянное магнитное поле, направленное по касательной к плоскости пленки параллельно антеннам. Такая взаимная ориентация поля и пленки обеспечивала распространение гибридных квази-поверхностных электромагнитно-спиновых волн в слоистой структуре.

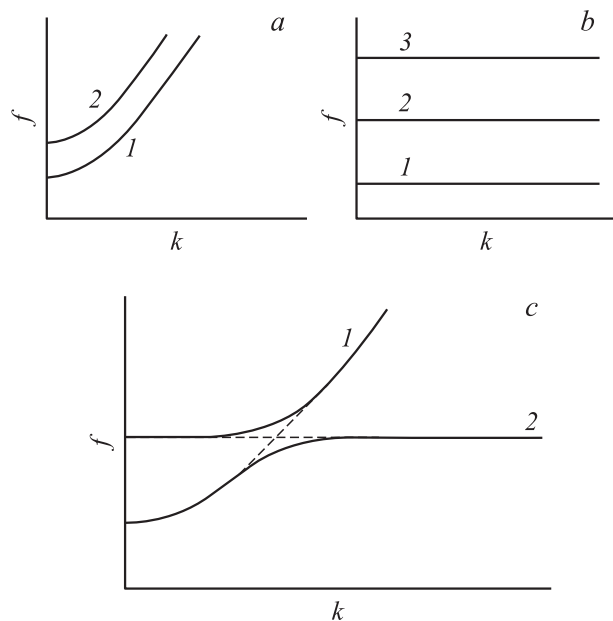
Измерения рабочих характеристик изготовленных фазовращателей были проведены для внешних магнитных полей от 900 до 2100 Oe. Изменение магнитного поля в таких пределах позволяло регулировать рабочие частоты фазовращателя примерно от 4 до 8,5 GHz.

В пластинах BST создавали электрическое поле величиной до 20 kV/cm. Для этого к электродам пластин толщиной 200 и 500  $\mu\text{m}$  прикладывали электрическое напряжение до 400 и 1000 V соответственно.

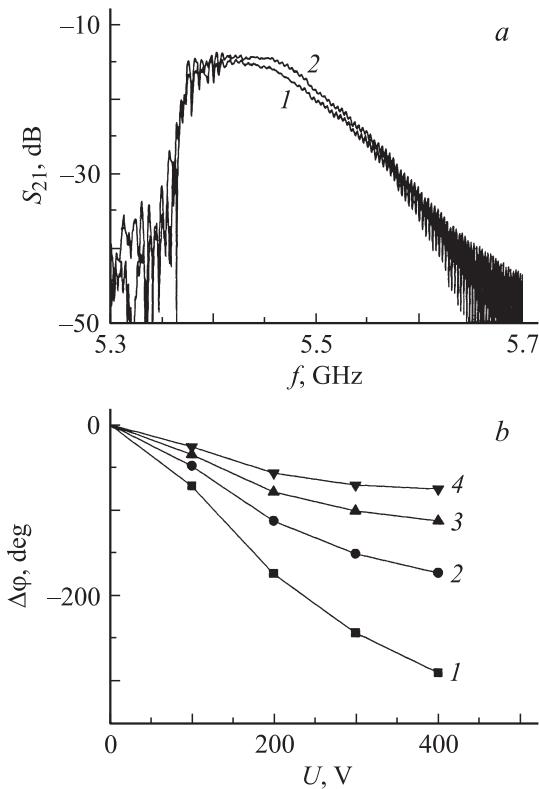
Экспериментальный макет имел конструкцию, предусматривавшую возможность использования пленок YIG и пластин BST различной толщины. Это позволило экспериментально изучить рабочие характеристики фазовращателя, а также влияние на них параметров волноведущей структуры и прикладываемых электрического и магнитного полей. При проведении исследований измерялись амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики фазовращателей при фиксированных значениях магнитного поля и различных значениях прикладываемого электрического напряжения.

## 2. Принцип работы фазовращателя

Входная микрополосковая антенна возбуждает поверхностную спиновую волну в пленке YIG. Распространяясь, волна входит в область, где пленка YIG находится в контакте с пластиной BST. На границе этой области поверхностная спиновая волна преобразуется в квази-поверхностную гибридную электромагнитно-спиновую волну, которая затем распространяется в слоистой структуре YIG/BST. Гибридная волна, пройдя слоистую структуру и достигнув другой ее границы, преобразуется обратно в поверхностную спиновую волну,



**Рис. 2.** *a* — качественное изображение дисперсионной кривой для электромагнитной моды  $TE_1$  в диэлектрическом волноводе при различных напряженностях электрического поля  $E$ : 1 — 0, 2 —  $> 0$ . *b* — дисперсионная кривая поверхностной спиновой волны в ферритовом волноводе при разных напряженностях магнитного поля  $H$ : 1 —  $H_1$ , 2 —  $H_2$ , 3 —  $H_3$ ,  $H_1 < H_2 < H_3$ . *c* — дисперсионные кривые электромагнитно-спиновых волн в феррит-сегнетоэлектрической слоистой структуре: 1 — мода  $TE_1$ , 2 — мода поверхностной спиновой волны.



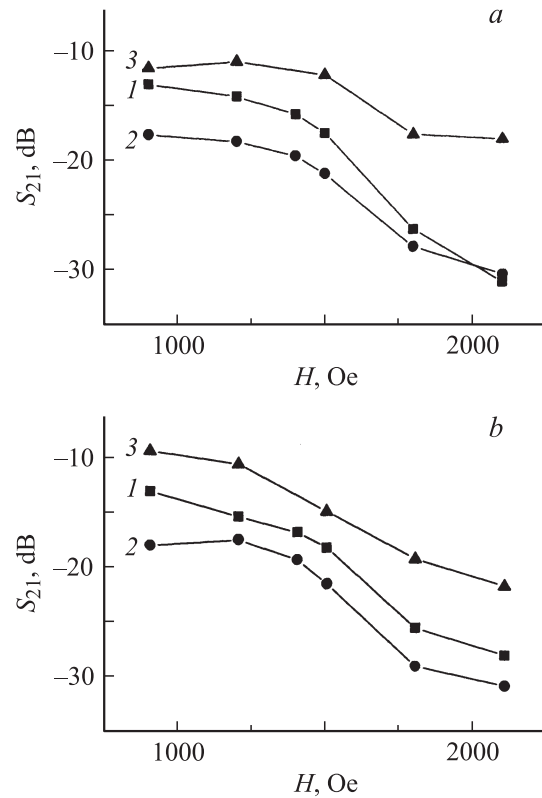
**Рис. 3.** *a* — типичные амплитудно-частотные характеристики фазовращателя, изготовленного из пленки YIG толщиной  $5.2\ \mu\text{m}$  и пластины BST толщиной  $200\ \mu\text{m}$ , измеренные при  $H = 1200\ \text{Oe}$  и при различных  $U$ : 1 — 0, 2 — 400 V. *b* — типичные зависимости изменения набега фазы от напряжения, измеренные на частотах: 1 — 5.4, 2 — 5.45, 3 — 5.5, 4 — 5.55 GHz.

которая затем принимается выходной микрополосковой антенной.

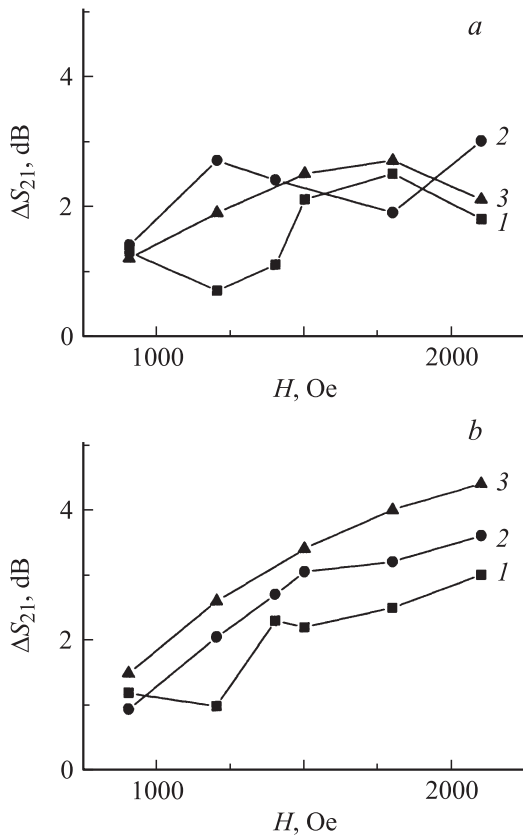
Рис. 2 иллюстрирует формирование спектра гибридных волн. Полный анализ спектра приведен в работе [16]. Здесь кратко остановимся на влиянии электрического и магнитного полей на свойства гибридных волн. На рис. 2, *a* качественно изображена дисперсионная кривая для электромагнитной моды  $TE_1$ , ее частотное положение изменяется при приложении к пластине BST электрического поля  $E$ . На рис. 2, *b* качественно изображена дисперсионная кривая поверхностной спиновой волны. Ее частотное положение изменяется при изменении магнитного поля  $H$ , которым намагничена пленка YIG. Таким образом, дисперсия гибридной волны, формирующейся в окрестности точки пересечения этих мод, как показано на рис. 2, *c*, меняется как при изменении магнитного поля, так и при приложении электрического поля. Такой эффект обеспечивает возможность совместного электрического и магнитного управления фазовым набегом электромагнитно-спиновых волн в фазовращателе на основе слоистой структуры YIG/BST.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Типичные рабочие характеристики феррит-сегнетоэлектрического фазовращателя, изготовленного из пленки YIG толщиной  $5.2\ \mu\text{m}$  и пластины BST толщиной  $200\ \mu\text{m}$ , показаны на рис. 3. Характеристики были измерены при фиксированной величине магнитного поля  $H = 1200\ \text{Oe}$  и при различных значениях  $U$ . На рис. 3, *a* показаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фазовращателя для двух случаев, а именно когда к слоистой структуре напряжение не приложено (кривая 1) и когда к BST приложено напряжение  $U = 400\ \text{V}$  (кривая 2). Из характеристик видно, что полоса пропускания фазовращателя, измеренная по уровню  $-20\ \text{dB}$  от уровня минимальных потерь, лежала в диапазоне от 5.36 до 5.62 MHz. Минимальные вносимые потери наблюдались на частоте около 5.41 MHz вблизи низкочастотной границы полосы пропускания (т.е. в области малых значений волновых чисел) и составляли  $-14.9\ \text{dB}$ . С увеличением частоты потери возрастали за счет уменьшения сопротивления излучения антенн спиновых волн в пленку YIG [17]. Приложение напряжения к электродам BST приводило к изменению потерь  $\Delta S_{21}$ , вносимых фазовращателем в СВЧ тракт. Для результатов, представленных на рис. 3, *a*, это изменение составляло около 1 dB.



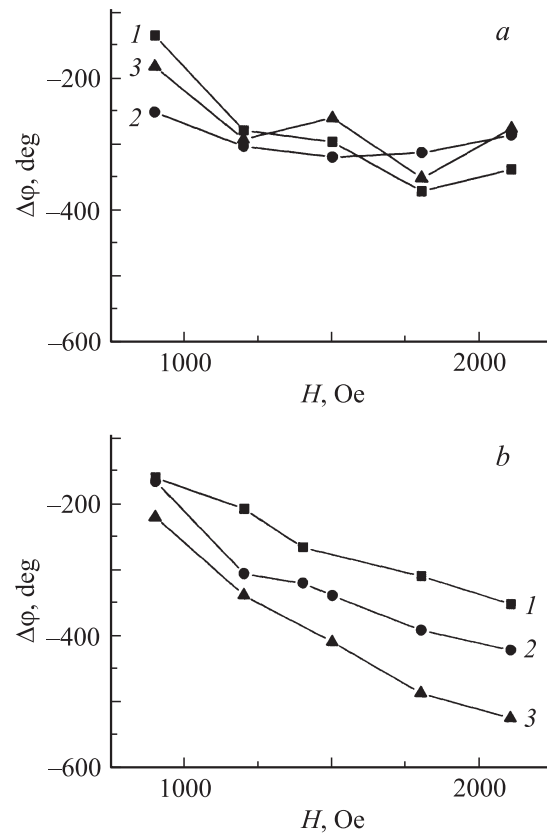
**Рис. 4.** Зависимости минимальных вносимых потерь  $S_{21}$  от магнитного поля  $H$  для YIG фазовращателей с пластинами BST толщиной 200 (*a*) и  $500\ \mu\text{m}$  (*b*) и с пленками YIG толщиной 5.2 (кривые 1), 9.6 (2) и  $18\ \mu\text{m}$  (3).



**Рис. 5.** Максимальное изменение потерь  $\Delta S_{21}$  от магнитного поля  $H$  для фазовращателей с пластинами BST толщиной 200 (a) и 500  $\mu\text{m}$  (b). Обозначения те же, что и на рис. 4.

На рис. 3, b приведены зависимости дифференциального фазового сдвига  $\Delta\varphi$  фазовращателей, измеренные для различных частот в пределах полосы пропускания. Видно, что фазовращатели обеспечивали плавное изменение фазы до значений более 180 deg. Максимальное значение изменения фазы  $\Delta\varphi_{\text{max}}$  составляло 290 deg. При увеличении частоты изменение фазы уменьшалось. Таким образом, максимальная электрическая управляемость фазовращателя имела место на частотах минимальных потерь, что хорошо соответствует теории [16].

Аналогичные экспериментальные результаты были получены при разных значениях магнитных полей и для структур другой геометрии. Заметим, что зависимость частоты низкочастотного склона АЧХ от магнитного поля хорошо описывалась известной формулой  $f = \gamma(H(H + M))^{1/2}$ , где  $\gamma = 2.8 \text{ MHz/Oe}$ . На ри. 4 приведены зависимости минимальных вносимых потерь фазовращателя от величины магнитного поля. Из графиков видно, что с увеличением магнитного поля вносимые потери возрастали. Это объяснялось уменьшением эффективности возбуждения и приема спиновых волн при высоких магнитных полях. Толщина пленки YIG по-разному влияла на вносимые потери. Самые низкие потери демонстрировали фазовращатели, имевшие пленку YIG толщиной 18  $\mu\text{m}$ . Толщина пластины BST не оказывала существенного влияния на вносимые потери.



**Рис. 6.** Зависимости максимального изменения набег фазы от магнитного поля при  $U = 400$  (a) и 1000 V (b). Обозначения те же, что и на рис. 4.

Как демонстрирует рис. 3, a, приложение электрического напряжения вело к изменению вносимых потерь. На рис. 5 показаны зависимости вносимых потерь  $\Delta S_{21}$  от магнитного поля  $H$ . Из графиков видно, что увеличение  $H$  ведет к росту  $\Delta S_{21}$ . Вносимые потери  $\Delta S_{21}$  также возрастали с увеличением толщины пластины BST. Для BST толщиной 200  $\mu\text{m}$  определенной зависимости  $\Delta S_{21}$  от толщины пленки YIG не прослеживалось (рис. 5, a), в то время как для BST толщиной 500  $\mu\text{m}$  увеличение толщины пленки YIG вело к увеличению  $\Delta S_{21}$  (рис. 5, b).

Из рис. 3, b видно, что большее изменение фазового набег  $\Delta\varphi$  при приложении напряжения  $U$  происходит на более низких частотах, взятых в пределах полосы пропускания фазовращателя. В этом диапазоне дифференциальный фазовый сдвиг более 180 deg наблюдался для обоих фазовращателей при приложении напряжения к слою BST. Максимальные значения  $\Delta\varphi$ , наблюдавшиеся в экспериментах при различных значениях  $H$ , приведены на рис. 6, a для слоистых структур с BST толщиной 200  $\mu\text{m}$  и на рис. 6, b для слоистых структур с BST толщиной 500  $\mu\text{m}$ . Из рисунков видно, что увеличение магнитного поля ведет в общем случае к возрастанию  $\Delta\varphi$ . Данный эффект наиболее ярко выражен в случае использования BST толщиной 500  $\mu\text{m}$ . В этом случае увеличение толщины пленки YIG вело к возрастанию  $\Delta\varphi$ . Максимальное значение  $\Delta\varphi = 522 \text{ deg}$

достигалось при  $H = 2100$  Ое для структуры с пленкой YIG толщиной  $18 \mu\text{m}$ .

## Заключение

В работе изучены характеристики СВЧ фазовращателей в диапазоне частот 4–8.5 GHz. Фазовращатели были изготовлены на основе двуслойных структур YIG/BST. Показано, что дифференциальный фазовый набег, возникающий при приложении напряжения к BST, возрастает при увеличении магнитного поля, а также при использовании более толстых пластин BST и пленок YIG. Вместе с тем увеличение магнитного поля ведет к возрастанию вносимых потерь и к более сильной зависимости вносимых потерь от прикладываемого напряжения. В качестве возможных вариантов ослабления этих эффектов можно предложить оптимизацию согласования пленки YIG с антеннами спиновых волн, а также использование сегнетоэлектриков с низкими диэлектрическими потерями.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, Министерства образования и науки России, Совета по грантам президента РФ для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ. В Oakland University работа выполнялась при поддержке Office of Naval Research и Army Research Office.

## Список литературы

- [1] Koul S. and Bhat B. Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters. Norwell, MA: Artech House, 1991
- [2] Buslov O.Yu., Keis V.N., Kotelnikov I.V., Kozyrev A.B., Tumarkin A.V. // IEEE MTT-S. Int. Microwave Symp. Dig. 2006. P. 1269–1272.
- [3] Kuylenstierna D., Vorobiev A., Linner P., Gevorgian S. // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. 2006. Vol. 16. N 4. P. 167–169.
- [4] Ji T., Abrham J.K., Varadan V.K. // IEEE Trans. MTT. 2006. Vol. 54. N 3. P. 1131–1138.
- [5] Rebeiz G.M. RF MEMS theory, design, and technology. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2003.
- [6] Adam J.D., Davis L.E., Dionne G.F., Schloemann E.F., and Stitzer S.N. // IEEE Trans. MTT. 2002. Vol. 50. N 3. P. 721–737.
- [7] Ishak W.S. // Proc. IEEE. 1988. Vol. 76. N 2. P. 171–187.
- [8] Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103. N 3. P. 031 101 (1–35).
- [9] Ozgur U., Alivov V., Morkoc H. // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 2009. Vol. 20. N 10. P. 911–952.
- [10] Устинов А.Б., Srinivasan G. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 6. С. 147–150.
- [11] Kim W.J., Chang W., Quadri S.B., Wu H.D., Pond J.M., Kirchoefer S.W., Newman H.S., Chrisey D.B., and Horwits J.S. // Appl. Phys. A. 2000. Vol. 71. N 1. P. 7–10.
- [12] Leach J.H., Liu H., Avrutin V., Rowe E., Ozgur U., Morkoc H., Song Y.-Y., Wu M. // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. N 6. P. 064 106 (1–5).

- [13] Demidov V., Edenhofer P., Kalinikos B. // Electron. Lett. 2001. Vol. 37. N 19. P. 1154–1155.
- [14] Ustinov A.B., Srinivasan G., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. N 3. P. 031 913 (1–3).
- [15] Калиникос Б.А., Ковшиков Н.Г., Колодин П.А., Панчурин И.П. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1985. Вып. 10 (382). С. 53–55.
- [16] Demidov V.E., Kalinikos B.A., Edenhofer P. // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. N 12. P. 10 007–10 016.
- [17] Дмитриев В.Ф., Калиникос Б.А. // Изв. вузов. Физика. 1988. Т. 31. № 11. С. 24–53.