

05;09

## 60 GHz фазовращатель на основе (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub> сегнетоэлектрической пленки

© А.Б. Козырев, А.В. Иванов, О.И. Солдатенков,  
А.В. Тумаркин, С.В. Разумов, С.Ю. Айгунова

С.-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»  
E-mail: mcl@eltech.ru

Поступило в Редакцию 24 мая 2001 г.

В окончательной редакции 24 июля 2001 г.

Представлена конструкция и СВЧ характеристики интегрального сегнетоэлектрического фазовращателя, работающего в миллиметровом диапазоне длин волн ( $f \sim 60$  GHz). Фазовращатель продемонстрировал в указанном частотном диапазоне вносимые потери  $S_{21} = -10$  dB и непрерывное изменение фазы СВЧ сигнала в диапазоне  $0 \div 220$  deg с малой величиной фазовой ошибки, не более  $\pm 5$  deg.

Исследования, проведенные ранее, продемонстрировали перспективность использования тонких сегнетоэлектрических пленок для перестраиваемых СВЧ устройств [1,2]. Это обусловлено рядом преимуществ, которыми обладают сегнетоэлектрические материалы по сравнению с полупроводниковыми и ферритовыми элементами СВЧ диапазона. Было показано, что нелинейные свойства тонких сегнетоэлектрических пленок позволяют успешно реализовывать на их основе фазовращатели СВЧ диапазона до 30 GHz включительно [1,2]. Кроме того, в ходе исследований было выяснено, что сегнетоэлектрические пленочные материалы продемонстрировали высокое быстродействие при воздействии униполярных импульсов напряжения, а также возможность работы при повышенных уровнях СВЧ мощности без существенной деградации диэлектрических свойств [3,4]. Немаловажным фактором также является относительно невысокая стоимость производства сегнетоэлектрических компонентов СВЧ устройств.

Однако в литературе практически отсутствуют данные о поведении тонких сегнетоэлектрических пленок на частотах (30  $\div$  60) GHz и информация о возможных характеристиках устройств на их основе для

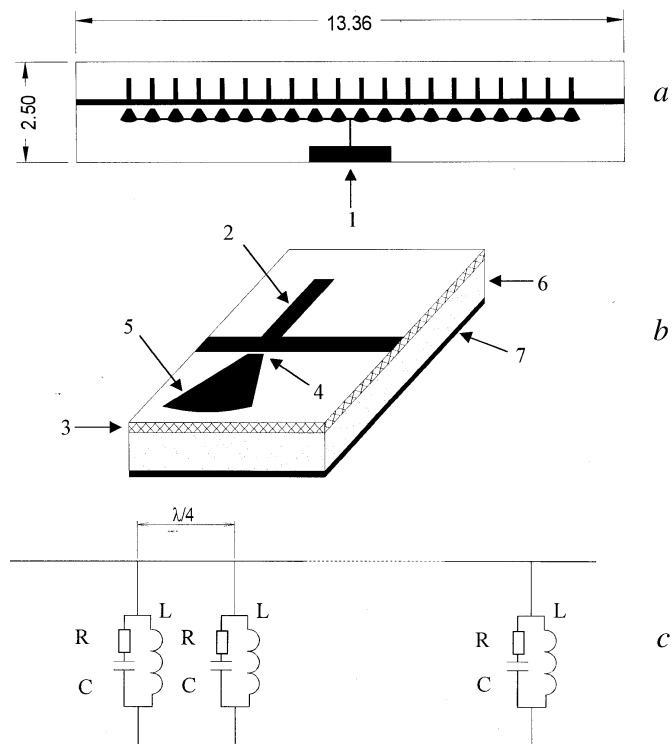
указанного СВЧ диапазона. В работе [5], посвященной исследованию объемных образцов Ba<sub>0.27</sub>Sr<sub>0.73</sub>TiO<sub>3</sub>, приведены данные о дисперсии диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  на частотах свыше 50 GHz, что должно отрицательно сказываться на характеристиках перестраиваемых СВЧ устройств из-за снижения их управляемости и увеличения вносимых потерь.

Настоящая работа посвящена созданию СВЧ фазовращателя на основе тонких Ba<sub>0.3</sub>Sr<sub>0.7</sub>TiO<sub>3</sub> сегнетоэлектрических пленок, работающего на частотах вблизи 60 GHz, и выяснению возможного влияния частотной дисперсии  $\epsilon$  сегнетоэлектрической пленки на его характеристики.

## Технология изготовления пленок Ba<sub>0.3</sub>Sr<sub>0.7</sub>TiO<sub>3</sub> и топология СВЧ фазовращателя

Используемые в работе пленки были получены на технологической установке Leybold Z-400 ионно-плазменным ВЧ магнетронным "on-axis" распылением керамической мишени состава Ba<sub>0.3</sub>Sr<sub>0.7</sub>TiO<sub>3</sub> диаметром 76 mm. Заметим, что именно такой композиционный состав мишени был признан нами оптимальным с точки зрения получения пленок с наилучшими параметрами для СВЧ применений [6]. Осаждение пленок на подложки поликора (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) проводилось в атмосфере чистого кислорода при давлении  $\sim 10$  Pa и температуре 905°C. После осаждения пленки структура охлаждалась в чистом кислороде со скоростью 2–3 C/min. Затем, на поверхность Ba<sub>0.3</sub>Sr<sub>0.7</sub>TiO<sub>3</sub> пленки методом термического испарения была нанесена пленка меди (Cu). Топология СВЧ схемы фазовращателя формировалась химическим травлением.

На рис. 1 представлены: топология (a), детализация одного из резонансных LC-контуров (b) и эквивалентная схема (c) сегнетоэлектрического СВЧ фазовращателя. Фазовращатель выполнен на подложке из поликора толщиной 125  $\mu\text{m}$  с пленкой Ba<sub>0.3</sub>Sr<sub>0.7</sub>TiO<sub>3</sub> толщиной  $\sim 0.7$   $\mu\text{m}$  и медной металлизацией толщиной  $\sim 1$   $\mu\text{m}$ . Микрополосковая линия с характеристическим сопротивлением  $z_0 = 50 \Omega$  периодически нагружена двадцатью параллельными LC-контурами. LC-контур образован параллельным соединением индуктивности (L), которая выполнена в виде прямоугольного шлейфа длиной больше чем  $\lambda/4$ , на конце которого выполняется условие холостого хода, и емкостного зазора (C) между микрополосковой линией и радиальным  $\lambda/4$  шлейфом. Радиальный



**Рис. 1.** Топология (а), детализация LC-контура (b) и эквивалентная схема (c) сегнетоэлектрического СВЧ фазовращателя на основе нагруженной микрополосковой линии. I — контактная площадка для подачи постоянного напряжения; 2 — микрополосковый прямоугольный шлейф (L); 3 — пленка титаната бария-стронция; 4 — емкостной зазор (C); 5 — радиальный  $\lambda/4$  шлейф; 6 — подложка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 7 — металлизация (Cu). Размеры приведены в mm.

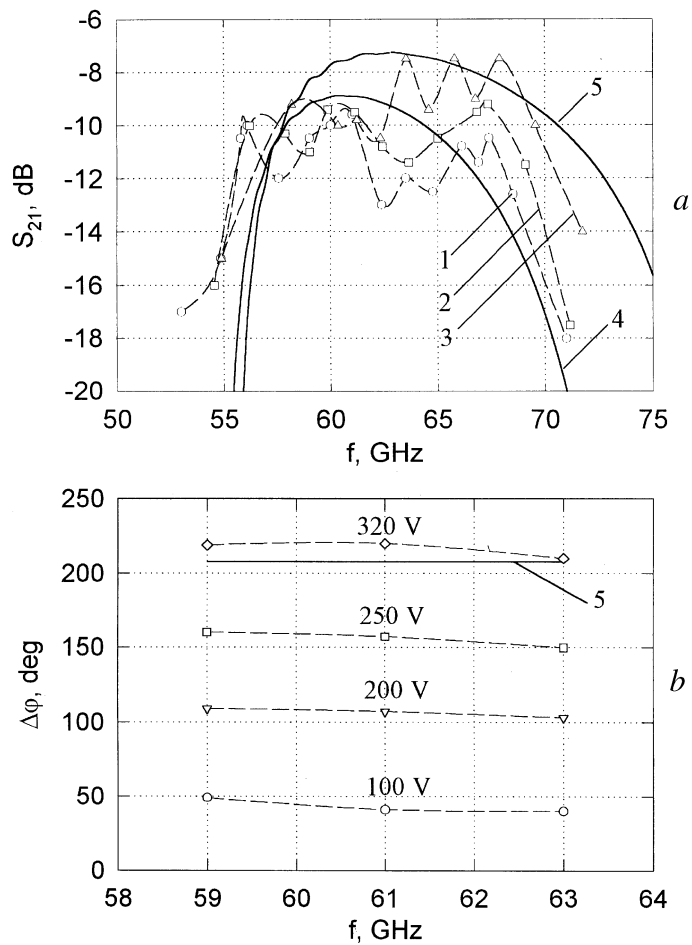
$\lambda/4$  шлейф обеспечивает условие короткого замыкания емкостного зазора по СВЧ сигналу. Постоянное управляющее напряжение подается на емкостные зазоры между микрополосковой линией и радиальными шлейфами, которые с помощью узких ( $30 \mu\text{m}$ ) микрополосковых линий связаны с контактной площадкой для подключения источника постоянного напряжения.

## СВЧ характеристики сегнетоэлектрического фазовращателя

Экспериментальные характеристики разработанного фазовращателя изображены на рис. 2. СВЧ измерения проводились с помощью волноводно-полосковых переходов, которые в диапазоне 55.5–65.5 GHz продемонстрировали следующие характеристики:  $S_{21} = -3$  dB и  $S_{11} = -7 \div -10$  dB. Указанные параметры переходов в дальнейшем учитывались при проведении измерений СВЧ фазовращателя и в основном определяли погрешность измерений. Сегнетоэлектрический фазовращатель продемонстрировал затухание СВЧ сигнала  $S_{21} \sim -10$  dB вблизи  $f \sim 60$  GHz и слабое изменение коэффициента прохождения  $\pm 0.5$  dB при приложении к емкостным сегнетоэлектрическим зазорам постоянного напряжения до 320 V. Изменение фазы СВЧ сигнала при этом составило  $\Delta\varphi = 220$  deg. Фазовая ошибка не превышала  $\pm 5$  deg в диапазоне частот 59–63 GHz при всех значениях напряжения управления. Коэффициент отражения ( $S_{11}$ ) фазовращателя в диапазоне частот 59.7–62 GHz был не хуже  $-5.5$  dB и практически не изменялся при приложении управляющего напряжения. Таким образом, фазовращатель продемонстрировал параметр качества  $F(60 \text{ GHz}) = \Delta\varphi/S_{21} = 22$  deg/dB.

Кроме экспериментальных зависимостей, на рис. 2 приведены расчетные зависимости  $S_{21}(f)$  и  $\Delta\varphi(f)$  (кривые 4, 5). Расчеты проводились на основе эквивалентных представлений микрополосковых элементов схемы. Емкостные зазоры моделировались в виде последовательного соединения емкости ( $C$ ) и сопротивления ( $R$ ), которое учитывает наличие диэлектрических потерь ( $\tan \delta$ ) в сегнетоэлектрической пленке. СВЧ свойства сегнетоэлектрических пленок описывались на основе экстраполяции до 60 GHz ранее полученной практически линейной частотной зависимости  $\tan \delta$  пленок в диапазоне 1–30 GHz [7]. Значения диэлектрических потерь, принятые в расчетах, составляли  $\tan \delta(U = 0) = 0.12$ . Расчет проводился в предположении отсутствия частотной дисперсии диэлектрической проницаемости. Управляемость  $K = 1.7$ , характерная для данных пленок на более низких частотах, также использовалась в расчетах [6].

Представленные расчетные характеристики достаточно хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Из-за погрешности результатов, полученных при пересчете характеристик устройства к



**Рис. 2.** Экспериментальные характеристики сегнетоэлектрического СВЧ фазовращателя (пунктирные линии):  $a$  — коэффициент прохождения,  $b$  — фазовый сдвиг при приложении управляющего напряжения, 1 —  $U = 0$  В, 2 —  $U = 200$  В, 3 —  $U = 320$  В; 4, 5 — расчетные характеристики фазовращателя, полученные в предположении  $C_1 = 0.0375$  пФ,  $\tan \delta_1 = 0.12$  и  $C_2 = 0.022$  пФ,  $\tan \delta_2 = 0.12$  соответственно.

параметрам используемых пленок, авторы оставляют открытым вопрос о наличии частотной дисперсии  $\epsilon$  в пленках Ba<sub>0,3</sub>Sr<sub>0,7</sub>TiO<sub>3</sub>, однако могут заключить, что, несмотря на возможность такого явления, оно не является препятствием для создания достаточно эффективных устройств на основе сегнетоэлектрических пленок вплоть до частот 60 GHz.

## Выводы

Рассмотрена конструкция и СВЧ характеристики интегрального сегнетоэлектрического фазовращателя, способного управлять фазой СВЧ сигнала в миллиметровом диапазоне длин волн. По нашим данным, это первая демонстрация возможности использования в указанном частотном диапазоне сегнетоэлектрических СВЧ фазовращателей и сегнетоэлектрической тонкопленочной технологии. СВЧ фазовращатель продемонстрировал параметр качества 22 deg/dB при фазовом сдвиге  $\Delta\varphi = 220$  deg на частотах вблизи 60 GHz.

## Список литературы

- [1] Козырев А., Иванов А., Солдатенков О., Гольман Е., Прудан А., Логинов В. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 20. С. 78–83.
- [2] Carlson C.M., Rivkin T.V., Parilla P.A., Perkins J.D., Ginley D.S., Kozyrev A.B., Osadchy V.N., Pavlov A.S. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. N 14. P. 1920–1922.
- [3] Козырев А.Б., Солдатенков О.И., Иванов А.В. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 19. С. 19–25.
- [4] Kozyrev A., Ivanov A., Samoilova T., Soldatenkov O., Astafiev K., Sengupta L. // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. N 9. P. 5334–5342.
- [5] Johnson D.A., Mallory K.B., Miller R.H., Pantell R.H., Szente P.A. // Proc. IEEE. 1963. V. 51. P. 332.
- [6] Razumov S., Tumarkin A., Buslov O., Gaidukov M., Gagarin M., Ivanov A., Kozyrev A. // Integrated Ferroelectrics. 2001 (in press).
- [7] Kozyrev A., Keis V., Buslov O., Ivanov A., Soldatenkov O., Loginov V., Taricin A., Graul J. // Integrated Ferroelectrics. 2001. V. 34. P. 271–307.