

05;09

Волноводно-щелевой 60 GHz фазовращатель на основе (Ba,Sr)TiO₃ сегнетоэлектрической пленки

© А. Козырев, М. Гайдуков, А. Гагарин,
А. Тумаркин, С. Разумов

С.-Петербургский государственный электротехнический университет
(ЛЭТИ)
E-mail: mcl@eltech.ru

В окончательной редакции 12 ноября 2001 г.

Представлены конструкция и СВЧ-характеристики сегнетоэлектрического фазовращателя на основе волноводно-щелевой линии, работающего в миллиметровом диапазоне длин волн ($f \sim 60$ GHz). Параметр качества фазовращателя 32 deg/dB. Фазовращатель обеспечивает непрерывное изменение фазы до 255 deg. Сегнетоэлектрические пленки показали значения диэлектрических потерь $\tan \delta = 0.04$ и управляемость $K \approx 1.7$, что является перспективным для их использования в данном диапазоне частот.

Исследования, проведенные ранее, продемонстрировали перспективность использования тонких сегнетоэлектрических пленок для перестраиваемых СВЧ-устройств и возможность успешной реализации на их основе фазовращателей СВЧ-диапазона до 30 GHz включительно [1,2]. Настоящая работа посвящена созданию фазовращателя на основе щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой, работающего на частоте 60 GHz, который может быть использован в качестве прототипа элемента фазированной антенной решетки для автомобильных радиолокационных систем безопасности [3].

Конструкция фазовращателя на основе волноводно-щелевой линии показана на рис. 1. Сегнетоэлектрический элемент, представляющий собой отрезок щелевой линии на поверхности подложки из поликора (Al₂O₃) с пленкой Ba_xSr_{1-x}TiO₃ (BSTO) и медной металлизацией, устанавливался вдоль волновода в плоскости *E*-поля. Изменение фазового набегу СВЧ-сигнала достигалось за счет изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки в зазоре щелевой линии

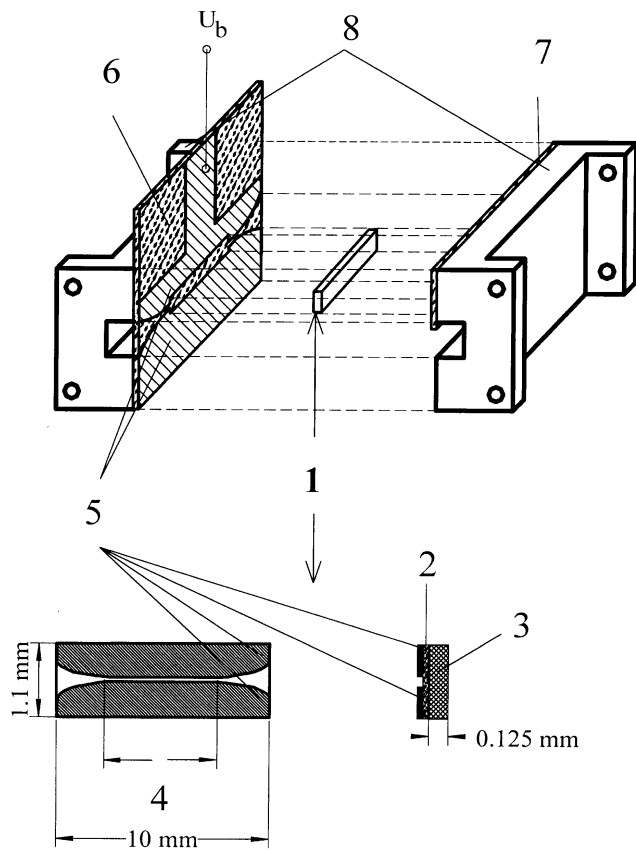


Рис. 1. Конструкция фазовращателя: 1 — сегнетоэлектрический элемент, 2 — сегнетоэлектрическая пленка, 3 — подложка (поликор), 4 — рабочий участок, 5 — пленка меди, 6 — пластина слюды с металлизацией, 7 — пластина слюды без металлизации, 8 — элементы волновода.

(длина рабочего участка 4 mm, ширина зазора $\sim 6 \mu\text{m}$) под действием напряжения управления (U_b). Подача напряжения и конструктивное крепление сегнетоэлектрического элемента осуществлялись за счет изолирующих пластин слюды (толщина $\sim 20 \mu\text{m}$) с медной металлизацией. Согласование волновых сопротивлений щелевой линии и

волновода достигалось с помощью трансформаторов, топология которых рассчитывалась по соотношениям, приведенным в [4].

Используемые в работе пленки были получены на технологической установке Leybold Z-400 ионно-плазменным ВЧ магнетронным "on-axis" распылением керамической мишени состава $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ диаметром 76 mm. Осаждение пленок на подложки поликора размером 15×15 mm и толщиной $125 \mu m$ проводилось в атмосфере чистого кислорода при давлении ~ 10 Pa и температуре $905^\circ C$. Толщина получаемых пленок составляла $\sim (0.5 \div 1) \mu m$. После осаждения пленки структура охлаждалась в чистом кислороде со скоростью $2 \div 3^\circ C/min$ [5]. Затем на поверхность BSTO пленки методом термического испарения наносилась пленка меди толщиной $\sim 1 \mu m$. Топология СВЧ-схемы фазовращателя формировалась жидкостной литографией. В качестве основы для создания сегнетоэлектрических элементов фазовращателя использовались BSTO пленки состава $x = 0.4$ (пленка № 1) и $x = 0.3$ (пленка № 2). Диэлектрическая проницаемость пленок составляла $\epsilon(U_b = 0) = 490$ и $\epsilon(U_b = 0) = 320$ для образцов № 1 и 2 соответственно.

На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные зависимости фазового набег от приложенного напряжения управления. Расчет фазового сдвига проводился на основе теории многослойных волноводно-щелевых структур [6]. В экспериментах образец 1 показал вносимые СВЧ-потери $S_{21} \sim -15$ dB вблизи $f \sim 60$ GHz. Потери уменьшались до -8 dB при приложении к рабочему элементу постоянного напряжения управления до 300 V. Непрерывное изменение фазы СВЧ-сигнала при этом составило $\Delta\varphi = 394$ deg. Образец № 2 показал затухание СВЧ-сигнала $S_{21} \sim -8$ dB с уменьшением до -6 dB при 300 V и $\Delta\varphi = 255$ deg. Согласующие элементы не были оптимизированы, что привело к $S_{11} = -4$ dB. Основным параметром, характеризующим фазовращатель, является его параметр качества $F[deg/dB] = \Delta\varphi/S_{21}$, который для образца 1 соответствует $F \sim 26$ deg/dB и для образца 2 — $F = 32$ deg/dB (F рассчитан по наибольшему значению S_{21}).

Механизмами СВЧ-потерь, определяющими значение S_{21} для волноводно-щелевой линии, являются потери в сегнетоэлектрической пленке ($\tan \delta$) и потери в металлических электродах. Для определения декремента затухания, обусловленного потерями в металле (α_m), проводились измерения добротности волноводно-щелевых резонаторов на поликоровых подложках без пленки сегнетоэлектрика. На рис. 3 приведены полученные зависимости потерь в металле от ширины щели для частот 30

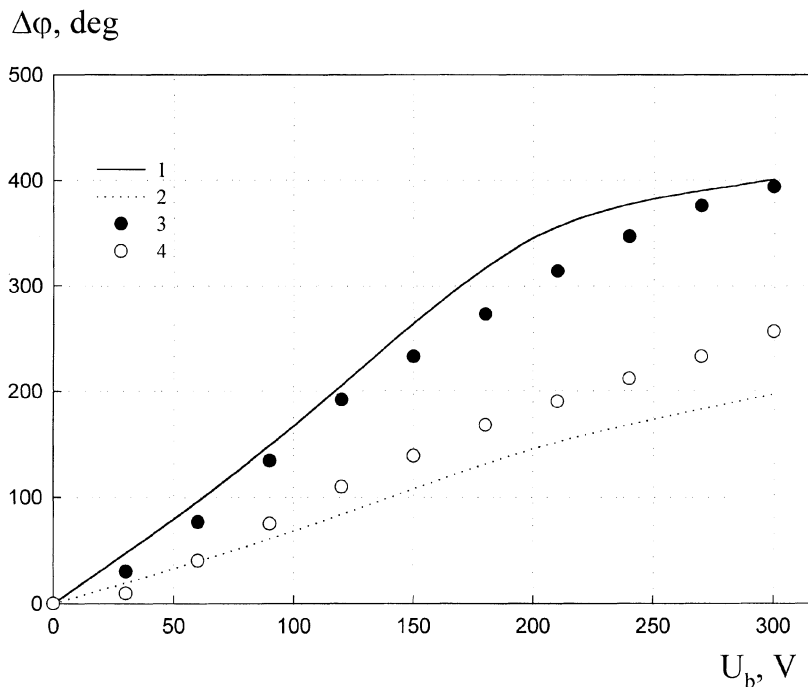


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные характеристики фазовращателя: 1 — расчет (образец № 1), 2 — расчет (образец № 2), 3 — эксперимент (образец № 1), 4 — эксперимент (образец № 2).

и 60 GHz. Изменение волнового сопротивления линии передачи при увеличении эффективной диэлектрической проницаемости подложки (ϵ_{eff}) за счет сегнетоэлектрической пленки приводит к росту потерь в металле пропорционально $\sim \epsilon_{eff}$ [4] по отношению к данным, приведенным на рис. 2. Расчет ϵ_{eff} с учетом сегнетоэлектрической пленки показывает, что металлические потери для щелевой линии с шириной зазора $6 \mu\text{m}$ могут быть оценены как $\alpha_m \sim 0.5 \text{ dB/mm}$. На основании измерения вносимого затухания сегнетоэлектрической линии и оценок потерь в металле можно определить потери в сегнетоэлектрической пленке (α_d). Для линий на основе пленок № 1 и 2 значения α_d составляли

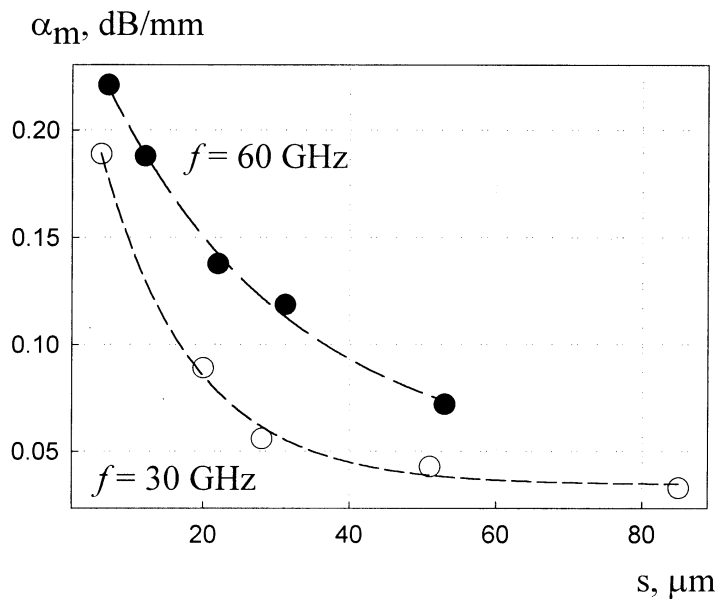


Рис. 3. Декремент затухания, определяющийся СВЧ-потерями в металлической пленке щелевой линии.

$\alpha_{d1} \approx 3.5$ dB/mm и $\alpha_{d2} \approx 1$ dB/mm. Таким образом, для данного диапазона частот (~ 60 GHz) выявляется преобладание диэлектрических потерь над потерями в металле и соответственно устанавливается ведущая роль качества сегнетоэлектрической пленки. Именно снижение роли металлических потерь на этих частотах позволяет уменьшить зазор линии до ~ 6 μm , что обеспечивает возможность снижения управляющих напряжений.

Анализ α_d позволяет оценить тангенс потерь пленок № 1 и 2 как $\tan \delta_1 \approx 0.12$ и $\tan \delta_2 \approx 0.04$. Пленки продемонстрировали управляемость $K_1 = \varepsilon(0V)/\varepsilon(300V) \approx 2$ и $K_2 \approx 1.7$. Параметр качества сегнетоэлектрических пленок, определяющий пригодность их использования на СВЧ, описывается соотношением $p = (K - 1)^2 / K \tan \delta_0 \tan \delta_U$ [7], где $\tan \delta_0$ и $\tan \delta_U$ — потери в сегнетоэлектрической пленке без приложенного напряжения управления и при $U_b \neq 0$. Для пленки № 2 $p \approx 250$,

что позволяет создание управляющих устройств миллиметрового диапазона с очень высокими параметрами. В частности, при оптимизации согласующих элементов фазовращателя его параметр качества может достигнуть $F = 40 \text{ deg/dB}$.

Список литературы

- [1] *Козырев А., Иванов А., Солдатенков О.* и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 20. С. 78–83.
- [2] *Carlson C.M., Rivkin T.V., Parilla P.A.* et al. // Applied Physics Letters. 2000. V. 76. N 14. P. 1920–1922.
- [3] *Qian Y., Itoh T.* // IEEE Transactions on MTT. 1998. V. 46. N 11. P. 1891–1900.
- [4] *Gupta K.C., Ramesh Garg, Inder Bahl* et al. Microstrip Lines and Slotlines, Second Edition. Artech House, 1996.
- [5] *Rasumov S., Tumarkin A., Buslov O., Gaidukov M., Gagarin A., Ivanov A., Kozurev A.* Electrical properties of magnetron sputtered thin BaSrTiO₃ films depending on deposition condititons. Integrated ferroelectrics, 2001 (in press).
- [6] *Мироненко И.Г., Иванов А.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 13. С. 16–21.
- [7] *Вендик О.Г., Мироненко И.Г., Тер-Мартirosян Л.Т.* // Изв. АН СССР. 1987. Т. 51. В. 10.