

05;09;12

СВЧ фазовращатель с планарными конденсаторами на основе пленок титаната стронция

© А. Козырев, А. Иванов, О. Солдатенков,
Е. Гольман, А. Прудан, В. Логинов

С.-Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 18 мая 1999 г.

Представлена конструкция СВЧ фазовращателя на основе нагруженной микрополосковой линии, в качестве нелинейных элементов которого были использованы планарные SrTiO_3 конденсаторы. СВЧ фазовращатель (при $T = 300 \text{ K}$) продемонстрировал в диапазоне частот 8.6–9.0 GHz непрерывное изменение фазы от 0 до $\sim 55 \text{ deg}$, при этом фазовая ошибка не превышала 5 deg. Параметр качества фазовращателя в рабочем диапазоне частот составил 110 deg/dB.

Нелинейные свойства сегнетоэлектрических материалов, таких как титанат стронция SrTiO_3 и титанат бария-стронция $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$, позволяют проектировать на их основе электрически управляемые устройства СВЧ диапазона (перестраиваемые резонаторы и фильтры, фазовращатели и т.д.) [1,2]. Предыдущие исследования сегнетоэлектриков продемонстрировали высокое быстродействие [3] и возможность работы при повышенных уровнях СВЧ мощности без существенной деградации диэлектрических свойств [4]. Принимая во внимание относительно невысокую стоимость сегнетоэлектрических нелинейных элементов по сравнению с аналогичными полупроводниковыми и ферритовыми компонентами, можно отметить перспективность их применения в СВЧ диапазоне. Обычно сегнетоэлектрические нелинейные элементы для СВЧ устройств, работающих при комнатных температурах, основаны на пленках $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$. Однако достаточно сильная температурная зависимость диэлектрической проницаемости и относительно высокий уровень СВЧ диэлектрических потерь этих материалов [5] ограничивают их применение в СВЧ диапазоне при $T = 300 \text{ K}$. Пленки SrTiO_3 используются при криогенных температурах ($T \leq 77 \text{ K}$) [2]. Тем не менее нелинейность диэлектрической проницаемости SrTiO_3 при повышенных

значениях постоянного электрического поля была недавно продемонстрирована авторами [6–8] при $T = 300$ К на низких частотах. Настоящая работа является первой демонстрацией использования пленок SrTiO_3 в электрически управляемых СВЧ устройствах при $T = 300$ К. В данной работе представлены результаты исследования характеристик СВЧ фазовращателя на основе планарных SrTiO_3 конденсаторов.

СВЧ свойства SrTiO_3 конденсаторов. Пленки SrTiO_3 были получены методом высокочастотного магнетронного распыления стехиометрической мишени в атмосфере $0.7 \text{O}_2 - 0.3 \text{Ar}$ при давлении $P = 4$ Па. Подложки планарных конденсаторов были изготовлены из монокристаллического сапфира (r -срез). Температура подложки ($T = 700^\circ\text{C}$) в процессе нанесения пленки поддерживалась постоянной. После достижения толщины пленки SrTiO_3 ($h = 0.8 \mu\text{m}$) напыление прекращалось и производилось охлаждение до комнатной температуры со скоростью $\sim 10 \text{ deg/min}$. Предварительно, до нанесения пленки SrTiO_3 , на поверхности подложки методом фотолитографии были сформированы платиновые (Pt) электроды. Зазор между электродами $g = 4 \mu\text{m}$. После нанесения пленки многослойная система SrTiO_3/Pt (электроды планарного конденсатора) / Al_2O_3 отжигалась в воздушной среде при $T = 1050^\circ\text{C}$ в течение двух часов. Более подробно технология создания многослойных структур, содержащих тонкую пленку SrTiO_3 , описана в [8]. Оценка нелинейности и диэлектрических потерь SrTiO_3 конденсаторов была произведена по резонансной методике [5] на частоте $f \sim 10 \text{ GHz}$ при $T = 300$ К. Было установлено, что при увеличении постоянного напряжения U_b , прикладываемого к исследованным конденсаторам, до величин $U_b = 400 \text{ V}$ емкость конденсаторов уменьшалась в 1.8 раза. При этом добротность конденсаторов $Q \sim 70$ ($Q = 1/\tan \delta$, $\tan \delta$ — диэлектрические потери) слабо, не более чем на 10%, увеличивалась при увеличении напряжения.

Топология СВЧ фазовращателя. Топология СВЧ фазовращателя представлена на рис. 1. Два параллельных LC-контура, содержащие планарные сегнетоэлектрические конденсаторы, включены в микрополосковую линию ($Z_0 = 50 \Omega$). LC-контуры соединены отрезком микрополосковой линии, имеющим меньшее волновое сопротивление ($Z_{01} = 40 \Omega$), что необходимо для улучшения согласования фазовращателя с внешними СВЧ цепями. Длина микрополосковой линии, соединяющей LC-контуры, примерно равна $3\lambda/4$ вблизи центральной частоты $f \sim 8.8 \text{ GHz}$ рабочего диапазона фазовращателя. Планарные

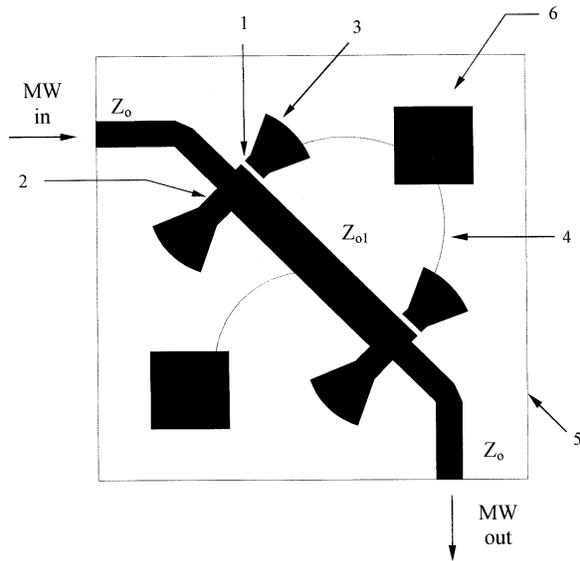


Рис. 1. Топология двухэлементного СВЧ фазовращателя. Размеры подложки $16.4 \times 16.4 \times 1.0$ mm. 1 — зазор для размещения планарного конденсатора, 2 — микрополосковая индуктивность, 3 — $\lambda/4$ радиальный шлейф, 4 — $10 \mu\text{m}$ проволока, 5 — подложка (поликор Al_2O_3), 6 — контактные площадки для подачи постоянного напряжения.

SrTiO_3 конденсаторы (C) размещались в зазорах между микрополосковой линией и радиальными $\lambda/4$ шлейфами, которые в данной конструкции фазовращателя обеспечивают выполнение условия короткого замыкания по СВЧ сигналу. Индуктивности (L) выполнены в виде отрезков микрополосковой линии с волновым сопротивлением $Z = 50 \Omega$ и длиной меньше $\lambda/4$ и закорочены по СВЧ сигналу с помощью радиальных $\lambda/4$ шлейфов. Постоянное напряжение (U_b) подается на планарные конденсаторы через тонкие ($\sim 10 \mu\text{m}$) серебряные (Ag) проволочки, припаянные к радиальным шлейфам и микрополосковой линии фазовращателя.

СВЧ характеристики фазовращателя. Частотные зависимости коэффициента прохождения (S_{21}) и фазового сдвига ($\Delta\varphi$) СВЧ фазовращателя представлены на рис. 2, *a, b*. Измерения были проведены при

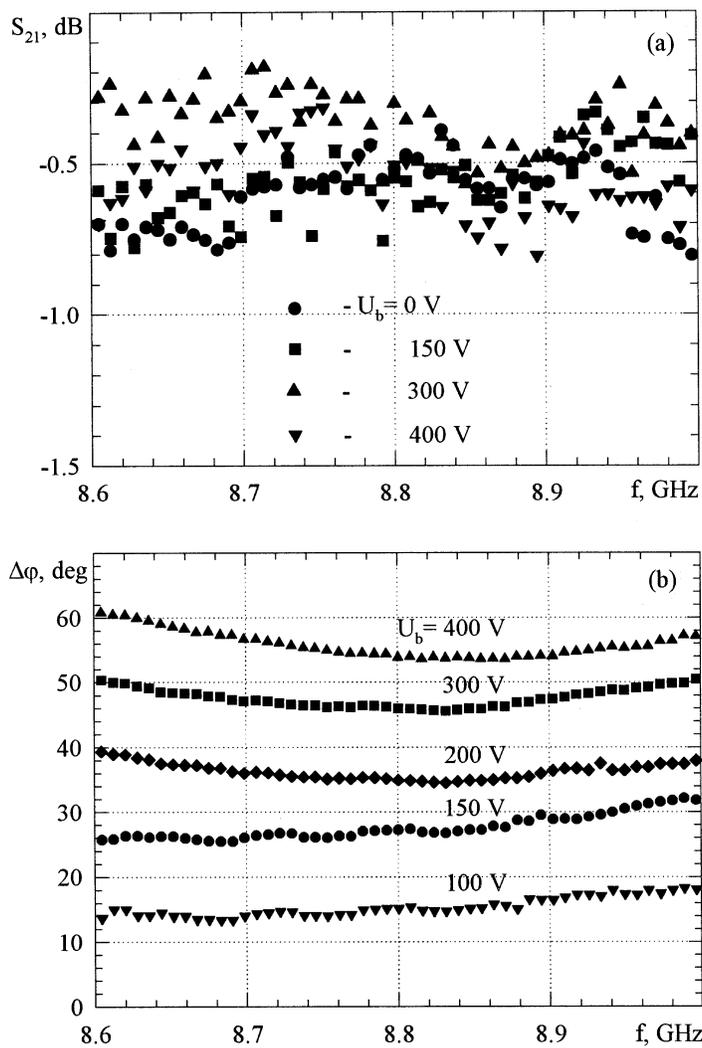


Рис. 2. СВЧ характеристики двухэлементного фазовращателя, в качестве нелинейных элементов которого были использованы планарные SrTiO_3 конденсаторы.

$T = 300$ К. На планарные SrTiO_3 конденсаторы подавалось постоянное напряжение $U_b = 0-400$ В. На центральной частоте рабочего диапазона вносимые фазовращателем потери не превышали величины 0.5 дБ и слабо изменялись при увеличении напряжения (рис. 2, а). Необходимо указать, что ошибка измерений коэффициента прохождения не превышает ± 2 дБ. Измерения коэффициента отражения (S_{11}) в диапазоне частот 8.6–9.0 GHz показали: $S_{11} = -13$ дБ, что соответствует потерям в фазовращателе за счет отражения СВЧ сигнала, примерно равным 0.2 дБ. Таким образом, дополнительные потери, порядка 0.3 дБ, обусловлены потерями в планарных SrTiO_3 конденсаторах и микрополосковой линии фазовращателя. Потери в подложке фазовращателя (Al_2O_3) и потери на излучение пренебрежимо малы для рассматриваемой конструкции. Измеренный фазовый сдвиг СВЧ сигнала в диапазоне частот 8.6–9.0 GHz варьировался от 0 до ~ 55 deg для напряжений 0–400 В (рис. 2, б). При этом максимальная фазовая ошибка составляла не более 5 deg в рабочем диапазоне частот. С учетом вносимого фазовращателем затухания СВЧ сигнала ($S_{21} = -0.5$ дБ) параметр качества может быть определен как 110 deg/dB.

Выводы. Экспериментально показано, что сегнетоэлектрические конденсаторы на основе SrTiO_3 пленок могут быть использованы как нелинейные элементы электрически управляемых СВЧ устройств, работающих при комнатной температуре. Рассмотренный СВЧ фазовращатель с планарными SrTiO_3 конденсаторами продемонстрировал непрерывное изменение фазы (0–55 deg) в рабочем диапазоне частот и параметр качества 110 deg/dB.

Список литературы

- [1] Varadan V.K., Ghodgaonkar D.K., Varadan V.V., Kelly J.F., Glikerdas P. // Microwave J. 1992. January. P. 116–125.
- [2] Subramanyam G., Van Keuls F., Miranda F.A // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. 1998. P. 78–80.
- [3] Козырев А.Б., Солдатенков О.И., Иванов А.В. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 19. С. 19–25.
- [4] Kozyrev A.B., Soldatenkov O.I., Samoilova T.B., Ivanov A.V., Koepe G.A., Mueller C.H., Rivkin T.V. Power handling capability and response time of microwave controlling devices based on ferroelectric films // Proceedings of International Symposium on Integrated Ferroelectrics. 1998 (in press).

- [5] *Kozyrev A.B., Keis V.N., Koepe G., Yandrofski R., Soldatenkov O.I., Dudin K.A., Dougan D.P.* // *Microelectronic Engineering*. 1995. V. 29. P. 257–260.
- [6] *Abe K., Komatsu S.* // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1993. V. 32. P. L1157–L1159.
- [7] *Prudan A.M., Golman E.K., Kozyrev A.B., Kozlov A.A., Loginov V.L.* // *Tech. Phys. Lett.* 1998. V. 24. P. 332–333.
- [8] *Прудан А.М., Гольман Е.К., Козырев А.Б., Козлов А.А., Логинов В.Е., Земцов А.В.* // *ФТТ*. 1998. Т. 40. № 8. С. 1473–1478.