

01;05;06;09;12

# Интегральные сегнетоэлектрические фазовращатели миллиметрового диапазона длин волн на основе периодических структур

© О.Ю. Буслов, В.Н. Кейс, А.Б. Козырев, И.В. Котельников, П.В. Кулик

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,  
197376 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: mcl@eltech.ru

(Поступило в Редакцию 23 ноября 2004 г.)

Теоретически и экспериментально исследованы интегральные фазовращатели (ФВ) частотного диапазона 26–32 GHz на основе периодических структур с параллельным и последовательным включением в линию передачи сегнетоэлектрических  $\text{BaSrTiO}_3$  варакторов. Проведен анализ дисперсионных характеристик и вносимых потерь линий передачи фазовращателей с учетом зависимостей емкости и тангенса угла потерь варакторов от напряжения управления и температуры. Показано, что для подавления паразитной амплитудной модуляции в фазовращателях выбор схемы включения варакторов определяется характером зависимости их тангенса потерь от напряжения. Продемонстрировано, что в ФВ с последовательным включением варакторов удастся значительно уменьшить зависимость фазового сдвига от температуры по сравнению с устройством с параллельно включенными варакторами.

## Введение

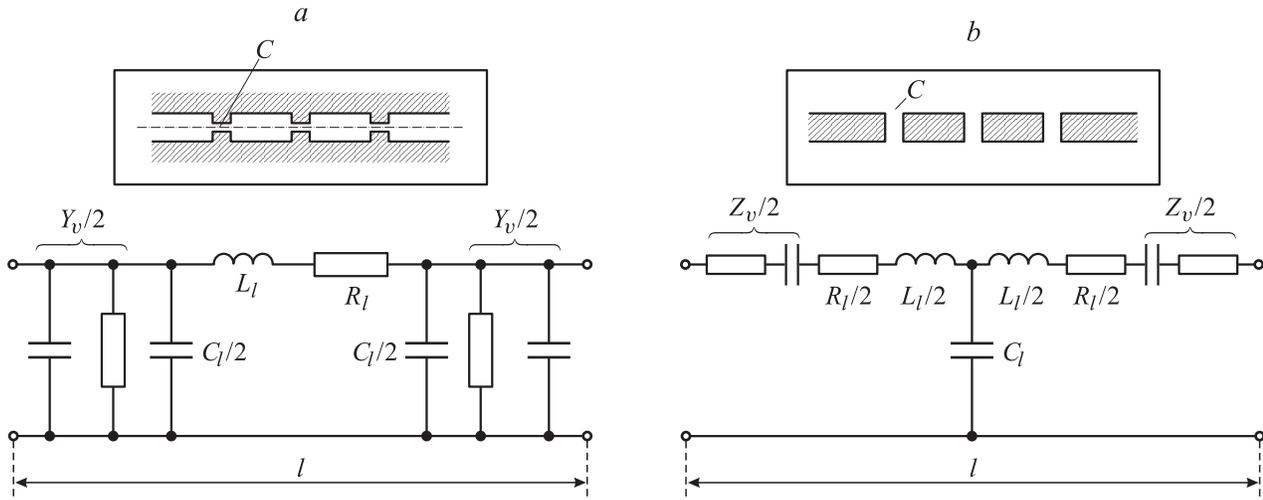
Фазовращатель является одним из основных компонентов сканирующих антенных решеток, используемых в радарных, спутниковых и связных системах. Наибольшее распространение в настоящее время получили ФВ на основе ферритов и полупроводниковых диодов [1]. Однако наряду с этими направлениями активно ведутся работы по реализации ФВ с использованием микроэлектромеханических систем [2], пьезоэлектрических систем [3] и сегнетоэлектрических материалов [4,5]. Применение сегнетоэлектриков (СЭ) для реализации ФВ является весьма перспективным из-за высокой скорости управления фазовым сдвигом, высокого динамического диапазона, радиационной стойкости, простой технологии изготовления и низкой стоимости. К недостаткам сегнетоэлектрических элементов с точки зрения их использования в СВЧ фазовращательных устройствах необходимо отнести сравнительно высокий температурный коэффициент диэлектрической проницаемости и в ряде случаев существенное изменение тангенса диэлектрических потерь от напряжения. Первое ведет к необходимости соблюдения повышенных требований к термостабилизации устройств на основе сегнетоэлектрических элементов. Второе является причиной паразитной амплитудной модуляции полезного СВЧ сигнала при необходимости управления его фазой под действием управляющего напряжения. Заметим, что для сегнетоэлектрических пленок различной стехиометрии и дефектности зависимости диэлектрических потерь от напряжения на различных частотах могут иметь как возрастающий, так и убывающий характер [6,7]. Следует отметить, что в работе [5] показан принцип возможной температурной стабилизации фазовращателей на основе сегнетоэлектрических

пленок, однако в данном первоисточнике не содержится электродинамического анализа рассматриваемых схем.

В настоящей работе на основе анализа линий передачи периодически нагруженных сегнетоэлектрическими варакторами, включенными в линию параллельно или последовательно, показана возможность подавления указанных негативных явлений. Анализ фазовращательных сегнетоэлектрических структур проведен на основе исследований сегнетоэлектрических пленок в широком интервале частот (1–60 GHz), температур ( $T = 78–320$  K) и полей управления ( $E = 0–40$  V/ $\mu\text{m}$ ) [6–9]. Эксперименты, проведенные на интегральных ФВ, реализованных на щелевых и микрополосковых линиях, топология металлизации которых на сегнетоэлектрической  $\text{BaSrTiO}_3$  пленке обеспечивала периодическое включение варакторов, подтверждают результаты теоретического анализа.

## 1. Фазовый сдвиг и вносимые потери фазовращателей

Наиболее подходящими линиями для реализации ФВ с параллельно включенными СЭ варакторами являются копланарная, щелевая, волноводно-щелевая линии. Микрополосковая линия является основой ФВ с последовательно включенными варакторами. На рис. 1 показаны отрезки периодических структур и эквивалентные схемы ячейки ФВ на основе щелевой и микрополосковой линий. Постоянная распространения волны в периодических структурах ( $\gamma = \beta + j\alpha$ ) следующим образом



**Рис. 1.** Щелевая (а) и микрополосковая (b) линии периодически нагруженные варакторами.  $R_l, L_l, C_l$  — погонные параметры ненагруженной линии;  $Y_v = j\omega C + \omega C \operatorname{tg} \delta$ ,  $Z_v = -j/\omega C + \operatorname{tg} \delta/\omega C$  — проводимость и сопротивление варактора в схеме с параллельным и последовательным включением.

связана с параметрами элементов ячейки [7]:

$$\operatorname{ch} \gamma l = \operatorname{ch}(\beta + j\alpha)l = 1 + YZ, \quad (1)$$

где

$$Y = j \left( Y_0 \operatorname{tg} \frac{\beta_0 l}{2} + \omega C \right) + \omega C \operatorname{tg} \delta,$$

$$Z = jZ_0 \sin \beta_0 l + 2\alpha_0 Z_0 l$$

для схемы с параллельным включением варакторов;

$$Y = jY_0 \sin \beta_0 l,$$

$$Z = j \left( Z_0 \operatorname{tg} \frac{\beta_0 l}{2} - \frac{1}{\omega C} \right) + \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C} + \alpha_0 Z_0 l$$

для схемы с последовательным включением варакторов.

В приведенных выражениях  $Z_0 = 1/Y_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\alpha_0$  — волновое сопротивление, постоянная распространения и декремент затухания ненагруженной линии передачи;  $l$  — длина ячейки;  $C$  и  $\operatorname{tg} \delta$  — емкость и тангенс угла потерь СЭ варакторов, включенных в линию.

Подставляя параметры ячеек в уравнение (1) и разделяя действительные и мнимые части, можно получить дисперсионные уравнения и соотношения, определяющие вносимые потери на одну ячейку и характеристическое сопротивление линии,

$$\cos \beta_p l = \cos \beta_0 l - Z_0 \omega C(U, T) \sin \beta_0 l, \quad (3)$$

$$L_p \text{ (dB)} = 8.68 \left[ Z_0 \omega C(U, T) \operatorname{tg} \delta(U, T) \sin \beta_0 l + 2\alpha_0 l \left( \operatorname{tg} \frac{\beta_0 l}{2} + Z_0 \omega C(U, T) \right) \right] \cos \beta_p l, \quad (4)$$

$$Z_{cp} = \left[ (Y_0 \operatorname{csc} \beta_0 l)^2 - (\omega C - Y_0 \operatorname{ctg} \beta_0 l)^2 \right]^{-0.5} \quad (5)$$

для ФВ с параллельным включением варакторов и

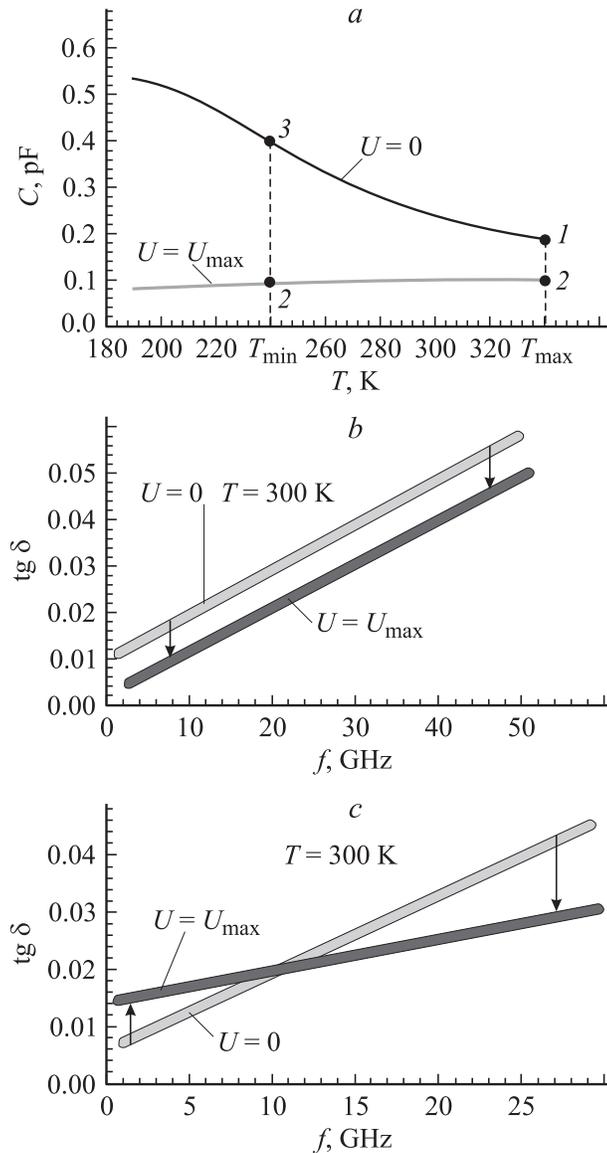
$$\cos \beta_s l = \cos \beta_0 l + \frac{Y_0}{\omega C(U, T)} \sin \beta_0 l, \quad (6)$$

$$L_s \text{ (dB)} = 8.68 \left( \frac{Y_0}{\omega C(U, T)} \operatorname{tg} \delta(U, T) \sin \beta_0 l + \alpha_0 l \sin \beta_0 l \right) \operatorname{csc} \beta_s l \quad (7)$$

$$Z_{cs} = \left[ (Z_0 \operatorname{csc} \beta_0 l)^2 - \left( \frac{1}{\omega C} + Z_0 \operatorname{ctg} \beta_0 l \right)^2 \right]^{0.5} \quad (8)$$

для ФВ с последовательным включением варакторов.

Для дальнейшего анализа линий, периодически нагруженных сегнетоэлектрическими варакторами, необходима информация о СВЧ свойствах сегнетоэлектрических элементов и их поведении под действием управляющего напряжения. Типичные температурные зависимости емкости  $C(T)$  и частотные зависимости потерь  $(\operatorname{tg} \delta(f))$  при различных напряжениях управления для варакторов на основе высокоориентированных, близких к монокристаллическим  $\text{BaSrTiO}_3$ , пленок, полученных магнетронным распылением [8,9], приведены на рис. 2, а, б. Характерной особенностью зависимости  $C(T)$  является практически постоянная величина емкости в широком температурном диапазоне при приложении максимального управляющего напряжения. Отметим, что монотонно падающая зависимость  $C(U)$  является характерной для сегнетоэлектрических пленок любой стехиометрии и дефектности. Однако возможный характер зависимости СВЧ диэлектрических потерь от напряжения может быть различным в зависимости от состава пленки, ее дефектности и частоты измерения. Например, для пленок  $\text{BaSrTiO}_3$ , полученных по керамической технологии (повышенная дефектность) [6], в отличие от



**Рис. 2.** Температурные зависимости емкости (а) (толщина пленки  $\sim 1 \mu\text{m}$ , ширина зазора металлических  $\sim 5 \mu\text{m}$ , длина электродов  $0.4 \text{ mm}$ ) и частотные зависимости потерь при различных напряжениях управления для варакторов на основе высокоориентированных (b) и керамических (c) пленок.

зависимостей, приведенных для пленок, близких к монокристаллическим, типичен кроссовер частотных зависимостей  $tg \delta(f)$  при различных напряжениях смещения (рис. 2, c). Таким образом, при создании СВЧ устройств необходимо учитывать характер и степень зависимости СВЧ потерь в сегнетоэлектрической пленке от напряжения для подавления амплитудной модуляции, неизбежно возникающей в устройстве с изменяющимися вносимыми потерями  $L(tg \delta(U))$ .

Используя рис. 2, а проанализируем возможные изменения фазы в структурах с последовательным и параллельным включением варакторов при изменении темпе-

ратуры в интервале  $T_{min} - Y_{max}$  и напряжения управления в интервале  $U = 0 - U_{max}$ . На рис. 3 показана зависимость фазового сдвига на одну ячейку от ее электрической длины для рассматриваемых ФВ при различных значениях отношения волнового сопротивления ненагруженной линии к реактивному сопротивлению СЭ варактора, т.е.  $Z_0 X_c = Z_0 \omega C$ . Анализ этих зависимостей совместно с зависимостью  $C(T, U)$  приводит к следующим выводам. Для ФВ с параллельным включением варакторов при максимальной рабочей температуре  $T_{max}$  и подаче на варакторы максимального управляющего напряжения  $U_{max}$  фазовый сдвиг на одну ячейку составляет  $\Delta\varphi(T_{max})$ , т.е. переход (для примера) с точки 1 в точку 2 (рис. 2, а и 3). При этом число ячеек ФВ составляет  $n = 360^\circ / \Delta\varphi(T_{max})$ . При минимальной рабочей температуре  $T_{min}$  и  $U = 0$  емкость варактора увеличивается (точка 3). При  $T_{min}$  и подаче на ФВ напряжения  $U_{max}$  фазовый сдвиг на одну ячейку составляет  $\Delta\varphi(T_{min})$ , т.е. переход с точки 3 в точку 2. Дополнительный фазовый сдвиг ФВ за счет изменения температуры, очевидно, равен  $\Delta\varphi(T) = \varphi(T_{min}) - \varphi(T_{max})$ . Аналогичные рассуждения на основе кривых (рис. 2, а и 3) для ФВ с последовательным включением варакторов приводит к выводу, что  $\Delta\varphi_p(T) > \Delta\varphi_s(T)$ , т.е. интервал изменения фазы за счет изменения температуры (переход из точки 1 в точку 3 и наоборот) будет всегда больше для параллельного включения варакторов. Причем это неравенство выполняется при любых соотношениях  $Z_0/X_c$  и любых значениях электрической длины ячейки  $\beta_0 l$  при условии, что  $n \cdot \Delta\varphi(T_{max}) = 360^\circ$ . Можно сделать вывод, что ФВ с последовательным включением варакторов является более предпочтительным по сравнению с вариантом параллельного включения с точки зрения влияния температуры на фазовые характеристики устройств.

Рассмотрим возможность подавления паразитной амплитудной модуляции в приведенных структурах, принимая во внимание различный характер зависимостей  $tg \delta(U)$  для варакторов на основе различных пленок (рис. 2, b, c). Анализ выражений (4) и (7) для вносимых потерь рассматриваемых ФВ приводит к выводу, что основной вклад в потери ФВ вносят СЭ варакторы, причем для схемы с параллельным включением потери в варакторах пропорциональны произведению емкости и тангенса потерь  $L_p \sim C(U) \cdot tg \delta(U)$ , а для схемы с последовательным включением — их отношению  $L_s \sim tg \delta(U)/C(U)$ . Очевидно, что при использовании варакторов с падающей зависимостью  $tg \delta(U)$  (рис. 2, b, c для частот выше кроссовера) для подавления паразитной амплитудной модуляции фазовращателя целесообразно использовать схему с последовательным включением варакторов. В случае растущей зависимости  $tg \delta(U)$  (рис. 2, c для частот ниже кроссовера) подавление нежелательного эффекта можно получить, используя структуру с параллельным включением.

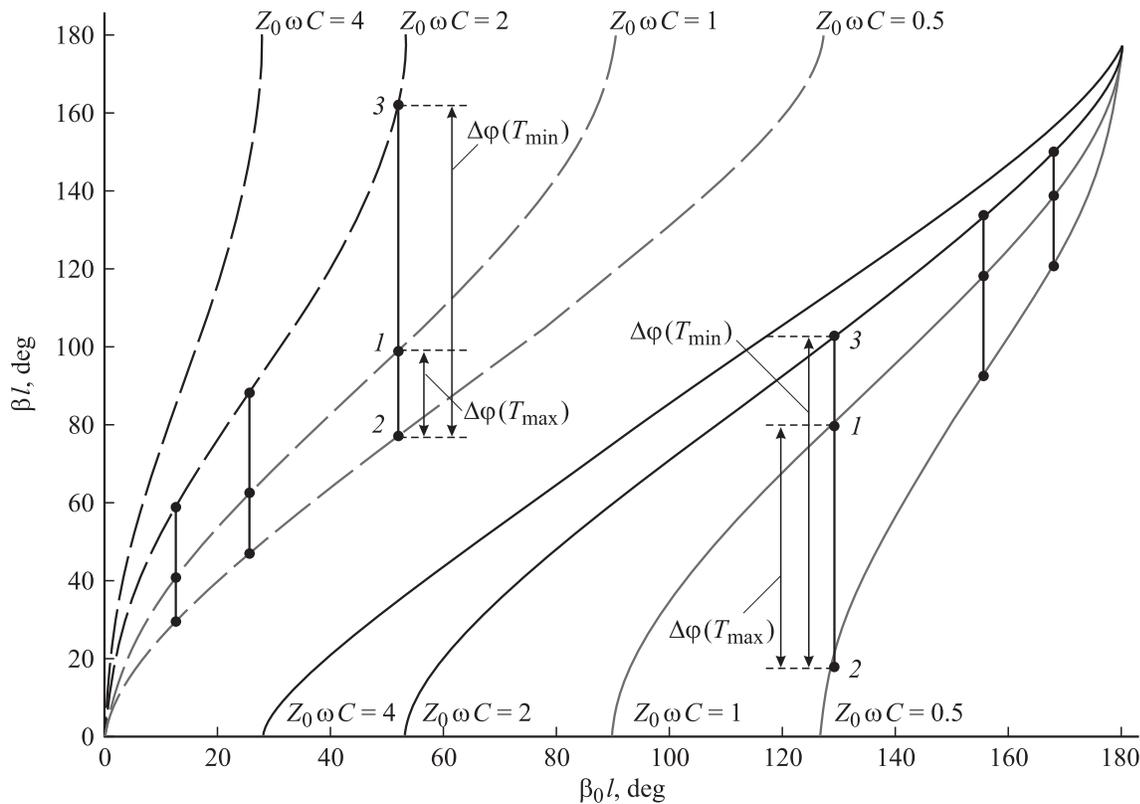


Рис. 3. Дисперсионные зависимости фазовращателей для параллельного (пунктир) и последовательного (сплошные линии) включения сегнетоэлектрических варакторов при различных значениях  $Z_0/X_c$ .

## 2. Конструкции ФВ и экспериментальные результаты

В настоящей работе были экспериментально исследованы интегральные ФВ, реализованные на щелевой и микрополосковой линиях с параллельным и последовательным включением варакторов. Фазовращатели представляли собой интегральную многослойную структуру (подложка, пленка  $\text{BaSrTiO}_3$ , металлическая пленка), топология металлизации которых на сегнетоэлектрической пленке обеспечивала периодичность включения варакторов. СЭ пленка  $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$  толщиной  $\sim 1 \mu\text{m}$  была получена методом высокочастотного магнетронного распыления на поликоробовую подложку толщиной  $0.5 \text{ mm}$ . Термическое распыление меди с последующим гальваническим нанесением пленки золота было использовано для формирования металлических электродов с шириной зазоров  $\sim 5 \mu\text{m}$  и длиной  $0.4 \text{ mm}$ . Коэффициент управления варакторов, характеризующий изменение емкости при подаче управляющего напряжения, составлял

$$k = \frac{C(U=0)}{C(U_{\text{max}}=300\text{V})} \cong 2.0.$$

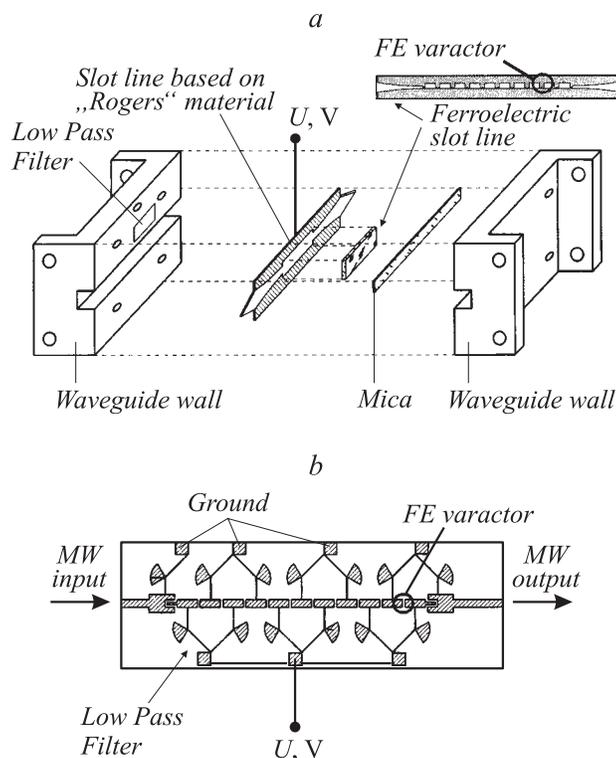
Зависимость  $\text{tg } \delta(U)$  используемой сегнетоэлектрической пленки носила падающий характер, соответствующий зависимости, представленной на рис. 2, b. Кон-

струкция фазовращателя на интегральной периодической структуре с параллельным включением сосредоточенных СЭ варакторов в щелевую линию содержала  $n = 11$  ячеек и схематически приведена на рис. 4, a. Фазовращатель впаивался в щелевую линию на основе материала „Rogers RT/Duroid 6002“ [10], которая устанавливалась в волновод в  $E$ -плоскости. Для согласования сегнетоэлектрической фазовращательной структуры с волноводом использовались экспоненциальные трансформаторы. Для подачи управляющего напряжения на сегнетоэлектрический элемент один из электродов линии на материале „Rogers“ был изолирован от корпуса волновода пластиной слюды толщиной  $20 \mu\text{m}$ .

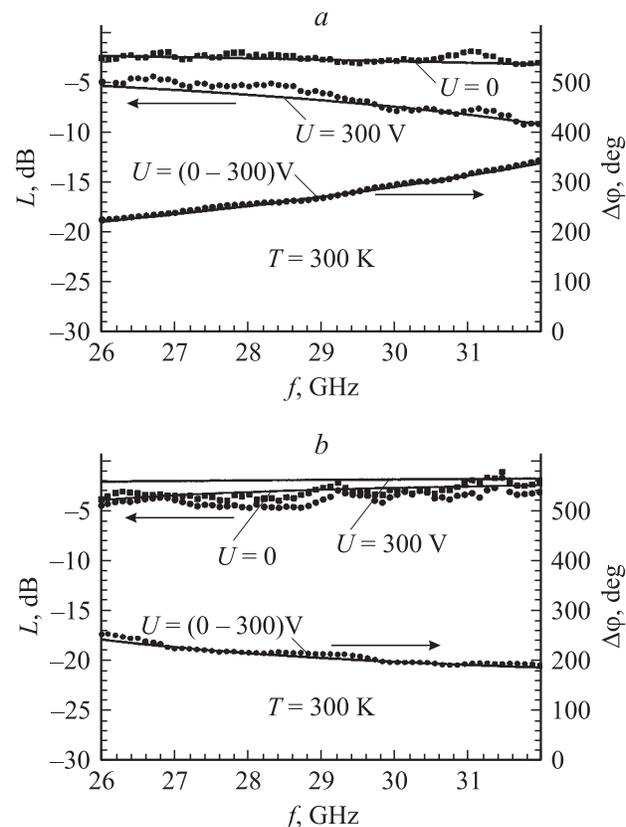
Конструкция фазовращателя с последовательным включением СЭ варакторов показана на рис. 4, b. ФВ сформирован на основе микрополосковой линии с сегнетоэлектрической пленкой и, так же как и в первом варианте устройства, содержал  $n = 11$  ячеек. Согласование структуры с регулярной микрополосковой линией производилось с помощью двух ступенчатых четвертьволновых трансформаторов. Для обоих типов ФВ развязка СВЧ цепей и цепей управления осуществлялась за счет фильтров низких частот и составляла  $\sim -20 \text{ dB}$ , коэффициент отражения от структур в диапазоне частот  $26\text{--}32 \text{ GHz}$  был лучше  $-15 \text{ dB}$ .

На рис. 5 приведены расчетные и экспериментальные частотные зависимости коэффициента передачи и фазо-

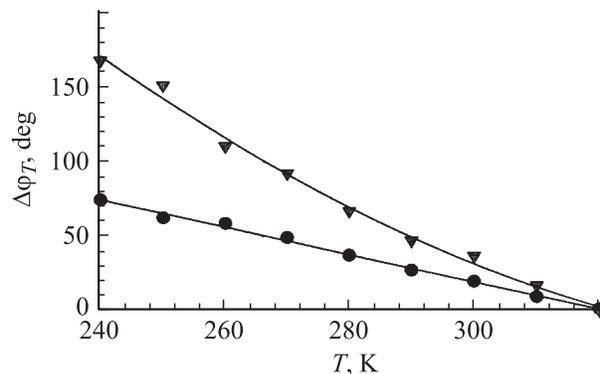
вого сдвига устройств с параллельным и последовательным включением СЭ варакторов, которые подтверждают сделанный ранее вывод о возможности подавления амплитудной модуляции коэффициента передачи для ФВ с последовательным включением варакторов при падающей зависимости  $\text{tg } \delta(U)$ . На рис. 6 приведены зависимости дополнительных фазовых набегов для двух исследуемых устройств за счет изменения температуры при отсутствии напряжения управления. Эти результаты также подтверждают ранее сделанный вывод об уменьшении температурной нестабильности фазового сдвига для ФВ структур с последовательным включением варакторов. Заметим, что, несмотря на достаточно наглядное проявление эффекта подавления температурной нестабильности за счет схемного решения, его нельзя рассматривать удовлетворительным с точки зрения окончательного решения проблемы температурной стабилизации. Температурный коэффициент фазы (ТКФ), соответствующий последовательному включению варакторов (рис. 6), составляет  $K_\varphi [\Delta\varphi_T/\Delta T] \cong 1 \text{ deg/K}$  и остается достаточно большим для ряда применений. Для ФВ с параллельным включением сегнетоэлектрических варакторов ТКФ составляет  $K_\varphi [\Delta\varphi_T/\Delta T] \cong 2 \text{ deg/K}$ . Дальнейшее увеличение ТКФ вплоть до значений  $K_\varphi \rightarrow 0$  может быть осуществлено за счет подачи на сегнетоэлектрические варакторы управляющего напряжения, являющегося функцией температуры [11].



**Рис. 4.** Конструкции фазовращателей для схемы с параллельным включением варакторов в щелевую линию (а) и с их последовательным включением в микрополосковую линию (б).



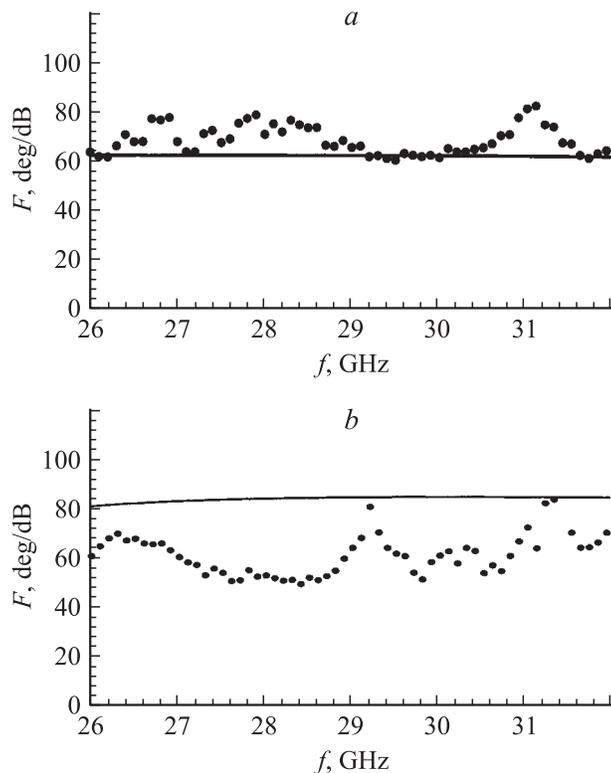
**Рис. 5.** Теоретические и экспериментальные частотные зависимости вносимых потерь и фазового набега фазовращателя при приложении напряжения управления для схемы с параллельным (а) и последовательным (б) включением варакторов.



**Рис. 6.** Сравнительная характеристика паразитного фазового набега для схемы с параллельным (▼) и последовательным (●) включением варакторов при изменении температуры.

На основании расчетных и экспериментальных данных проведена оценка параметра качества сегнетоэлектрических фазовращателей

$$F \left[ \frac{\text{deg}}{\text{dB}} \right] = \frac{\Delta\varphi}{\sqrt{L(U=0)} \cdot L(U=U_{\max})}. \quad (9)$$



**Рис. 7.** Теоретические (сплошные линии) и экспериментальные частотные зависимости параметра качества фазовращателя для схемы с параллельным (а) и с последовательным (б) включением варакторов.

Приведенные данные (рис. 7) свидетельствуют о хорошем соответствии расчетных и экспериментальных зависимостей и достаточно высоком для указанных частот значении параметра качества  $F \sim 60 \text{ deg/dB}$ . Следует отметить, что экспериментальные результаты параметра качества для схемы с последовательным включением сегнетоэлектрических конденсаторов несколько ниже расчетных. Это связано с влиянием цепей управления на характеристики СЭ конденсаторов, что приводит к снижению коэффициента управляемости  $k$  СЭ варакторов.

## Выводы

На основании данных о СВЧ свойствах сегнетоэлектриков и теоретического анализа периодических структур с параллельным и последовательным включением сегнетоэлектрических варакторов показана возможность подавления паразитной амплитудной модуляции фазовращателей и улучшения температурной стабильности их параметров за счет схемных решений. Правильность теоретических положений подтверждена экспериментальными исследованиями двух типов интегральных фазовращателей частотного диапазона 26–32 GHz, демонстрирующих параметр качества  $F \sim 60 \text{ deg/dB}$ .

## Список литературы

- [1] Uher J., Hoefler W. // IEEE Trans on MTT. 1991. Vol. 39. N 4. P. 643–653.
- [2] Borgioli A., Liw Y., Narga A.S., York R.A. // IEEE Microwave and Guided Wave Lett. 2000. Vol. 10. N 1. P. 7–9.
- [3] Poplavko Y., Prokopenko Y., Kazmirenko V., Kim B. // 12<sup>th</sup> Crimian Conf. CriMiCo'2002. P. 376–378. ISBN 966-7968-12-X, IEEE Cat Number 02EX570.
- [4] Erker E.G., Nagra A.S., Liu Yu., Periaswamy P., Taylor T.R., Speck J., York R.A. // IEEE Microwave and Guided Wave Lett. 2000. Vol. 10. N 1. P. 10–12.
- [5] Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Под ред. О.Г. Вендика. М.: Сов. радио, 1979.
- [6] Kozыrev A., Keis V., Osadchy V., Pavlov A., Buslov O., Sengupta L. // Integrated Ferroelectrics. 2001. Vol. 34. P. 189–195.
- [7] Kozыrev A., Keis V., Buslov O., Ivanov A., Soldatenkov O., Loginov V., Taricin A., Graul J. // Ibid. P. 271–278.
- [8] Разумов С.В., Тумаркин А.В. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 16. С. 17–21.
- [9] Razumov S.V., Tumarkin A.V., Gaidukov M.M., Gagarin A.G., Kozыrev A.B., Vendik O.G., Ivanov A.V., Buslov O.U., Keys V.N., Sengupta L.C., Zhang X. // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81. N 9. P. 1675–1677.
- [10] <http://www.rogerscorporation.com/mwu/translations/prod.htm>
- [11] Prudan A., Kozыrev A., Zemtsov A., Osadchy V., Kosmin D., Ginley D., Kaydanova T., Perkins J.D., Alleman J., Sengupta L., Chiu L., Zhang X. // Integrated Ferroelectrics. 2003. Vol. 58. P. 1337–1345.