

УДК 537.226.4

ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

© 2014 г. Ю. В. Гуляев¹, А. Ю. Митягин², Г. В. Чучева², М. С. Афанасьев²¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,

Российская Федерация, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,

Российская Федерация, 141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 20.04.2012 г.

Рассмотрен принцип создания широкополосной миниатюрной линии задержки СВЧ-диапазона на основе сегнетоэлектрических пленок. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований показано, что использование пленок в конструкции линии задержки позволяет: увеличить диапазон рабочих частот до 35 ГГц; снизить прямые потери до 3.0 дБ; устанавливать время задержки сигнала от 10 до 90 нс при управляющем напряжении до 30 В/мкм.

DOI: 10.7868/S0033849413110065

ВВЕДЕНИЕ

Линия задержки (ЛЗ) является одним из основных функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры. В настоящее время ЛЗ выполняются либо на базе отрезков радиочастотных кабелей, подстройка которых осуществляется укорочением длины кабеля, что является длительной и трудоемкой операцией, либо с фиксированной величиной времени. Линии задержки на ферритах не удовлетворяют требованиям по вносимым потерям, а также массогабаритным характеристикам. Управляемые ЛЗ на основе полупроводниковых варикапов ограничены уровнем проходного сигнала [1].

Повышение качественных характеристик ЛЗ требует использования новых материалов и технических решений. Одним из таких материалов является сегнетоэлектрик.

Различные проблемы, связанные с использованием сегнетоэлектрических материалов в технике СВЧ обсуждаются в литературе, начиная с середины 50-х годов. Первые публикации по применению сегнетоэлектриков в устройствах СВЧ [2–6] давали весьма оптимистический прогноз по параметрам этих устройств и их способности конкурировать с полупроводниковыми и ферритовыми приборами. Оказалось, что значение диэлектрической проницаемости пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ сохраняется достаточно большим и остается постоянным в широком интервале температур. Например, в работе [7] показано, что диэлектрическая проницаемость тонких гетероэпитакси-

альных пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ на диэлектрических подложках под действием приложенного постоянного поля может изменяться более чем в три раза. Однако при переходе к высоким частотам резко увеличивались потери в сегнетоэлектрических структурах, что делало их неприемлемыми для практического применения. Было установлено, что высокие потери на СВЧ связаны с тем, что получаемые пленки были низкого структурного качества с множеством разнообразных кристаллических дефектов.

В последние годы для получения сегнетоэлектрических пленок используются методы *in situ*, которые ранее из-за сложности конструкции оборудования были не осуществимы. Основная идея этих методов состоит в использовании низкотемпературной кислородной плазмы в качестве среды, где окислительный процесс при осаждении сегнетоэлектриков преобладает над восстановительным. Этот подход реализуется при лазерном распылении стехиометрической мишени в кислороде и при реактивном ионно-плазменном методе напыления. Данные методы позволили получать структурно-совершенные стехиометрические сегнетоэлектрические пленки высокого качества с низкими потерями в СВЧ-диапазоне частот [8].

1. КОНСТРУКЦИЯ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ

Линия задержки представляет собой микрополосковую линию (МПЛ) передачи СВЧ-сигнала с сосредоточенными на ней планарными конден-

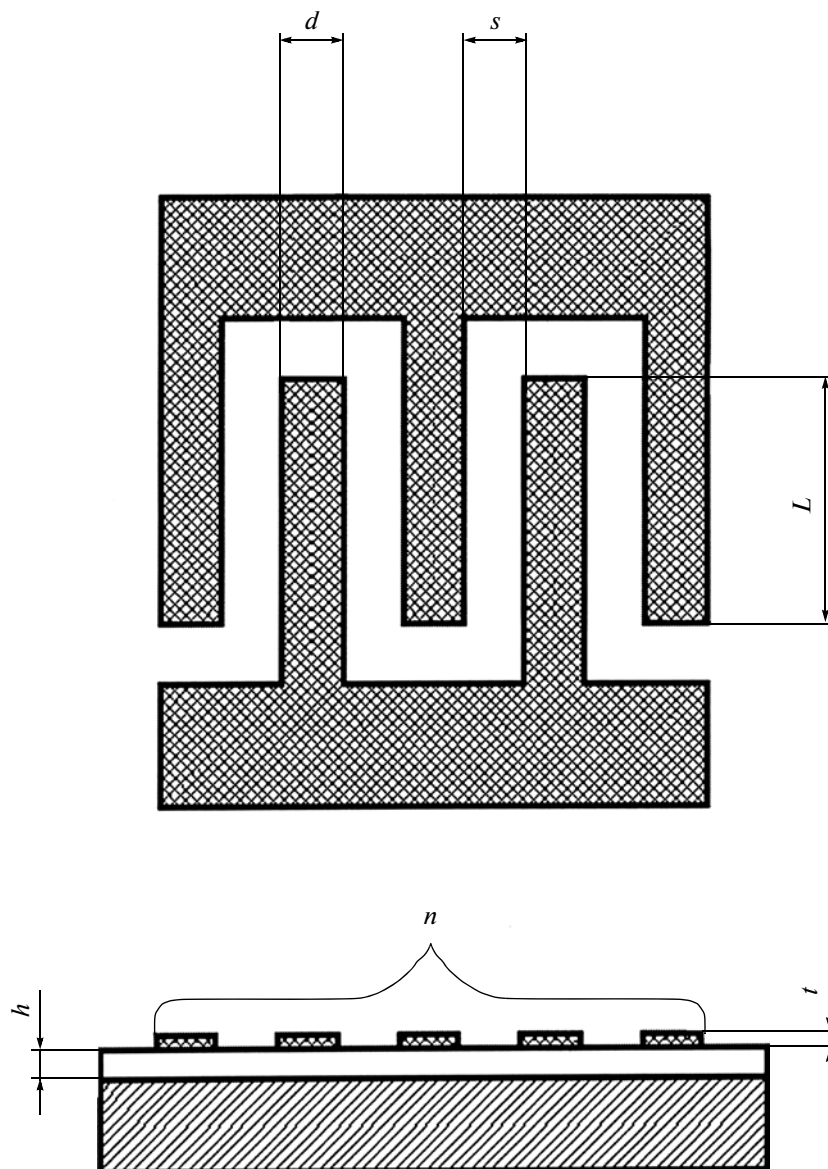


Рис. 1. Электронно-управляемый конденсатор на основе наноразмерной сегнетоэлектрической пленки: s – ширина зазора между встречными штырями; d – ширина штыря; L – апертюра (длина перекрывания штырей); h – толщина сегнетоэлектрической тонкой пленки; n – количество штырей; t – толщина слоя металлизации.

саторами переменной емкости. Задание и управление временем задержки сигнала осуществляется электрическим полем, посредством изменения емкости сосредоточенных на МПЛ конденсаторных элементов.

2. ЭЛЕКТРОННО-УПРАВЛЯЕМЫЙ КОНДЕНСАТОР НА ОСНОВЕ НАНОРАЗМЕРНОЙ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ

Для реализации ЛЗ были использованы планарные конденсаторы встречно-штыревого типа (рис. 1). Расчет топологии электронно-управляе-

мого конденсатора сводился к расчету диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрических пленок. Как правило, расчет диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки ϵ_f ведется по результатам измерения емкости планарного конденсатора. Методика такого расчета предложена в [9], в которой использованы достаточно простые аналитические соотношения, не требующие большого объема вычислений. В [10] рассмотрена более точная модель, которая позволяет рассчитать емкость планарной структуры, которая с тонким слоем сегнетоэлектрического материала с диэлектрической проницаемостью ϵ_f , нанесенным на диэлектрическую подложку с проницаемостью

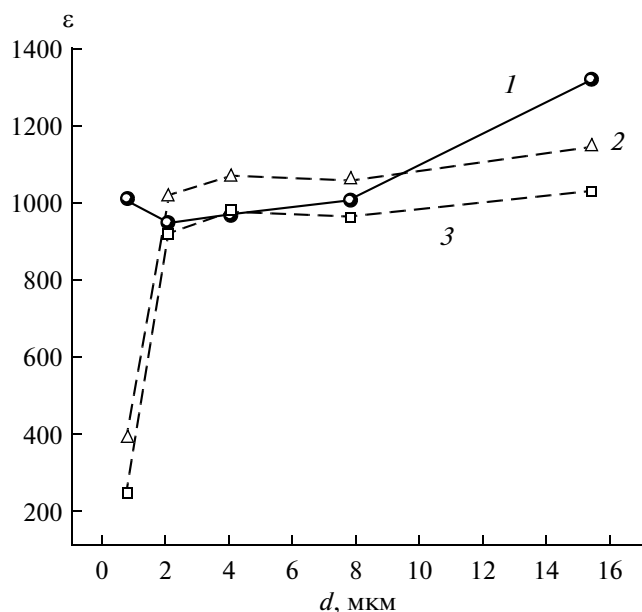


Рис. 2. Расчетные значения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической тонкой пленки $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ толщиной 20 нм, полученные для встречно-штыревых конденсаторов с различной шириной штыря. Кривые 1, 2, 3 рассчитаны по методикам, приведенным в работах [9, 10 и 11] соответственно.

ε_s , и двумя металлическими планарными электродами. Полученные в [10, 11] соотношения могут быть использованы для расчета емкости электронно-управляемого конденсатора.

Нами были рассчитаны величины диэлектрической проницаемости тонкой пленки $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ толщиной 20 нм, на основе которой могут быть реализованы встречно-штыревые конденсаторы с различной шириной штыря (рис. 2).

По результатам расчета (рис. 3) построен график зависимости емкости конденсатора от геометрических размеров структуры и величины диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрических пленок состава $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$.

3. КОНСТРУКЦИЯ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

Линии задержки на основе сегнетоэлектрической структуры можно разделить на два больших класса: 1) линии с положительной фазовой скоростью (рис. 4а) и 2) линии, имеющие отрицательную фазовую скорость (рис. 4б), в которые входят сегнетоэлектрические конденсаторы с емкостью, перестраиваемой под действием внешнего напряжения.

На рис. 4 представлены Т-схемы положительной и отрицательной фазосдвигающих линий.

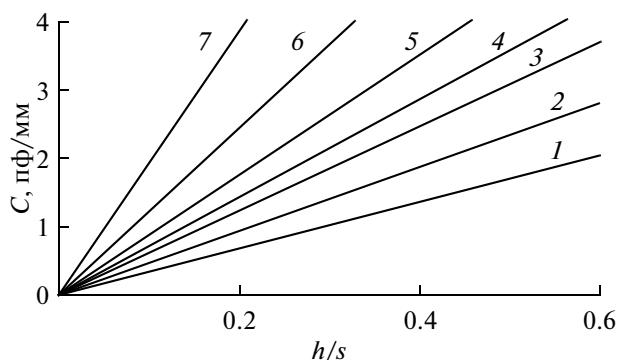


Рис. 3. Расчетная емкость планарного конденсатора от геометрических размеров структуры и величины диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки: $\varepsilon = 1000$ (1), 2000 (2), 2500 (3), 3000 (4), 3500 (5), 4000 (6), 4500 (7).

Первая представляет собой фильтр нижних частот с частотой среза

$$\omega_n = \sqrt{2/(L_1 C_1)},$$

а вторая — фильтр верхних частот с частотой отсечки

$$\omega_b = \sqrt{1/(2L_1 C_1)},$$

где L_1 и C_1 — индуктивность и емкость фазосдвигающей линии соответственно.

Таким образом, линия задержки, составленная из таких секций, будет являться полосно-пропускающим фильтром с широкой рабочей полосой частот:

$$\omega_n < \omega < \omega_b.$$

Конструкция копланарной линии (КПЛ), положительной фазосдвигающей линии задержки для частот выше 20 ГГц представлена на рис. 5. Фазовый сдвиг такой линии определяется эквивалентной электрической длиной, которая выражается соотношением

$$\phi_{21} = 2f_0 \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}} \mu_{\text{эф}}} \times l \times 180/c,$$

где f_0 — частота, $\varepsilon_{\text{эф}}$ и $\mu_{\text{эф}}$ — эффективная диэлектрическая константа и магнитная проницаемость соответственно, l — длина КМЛ, c — скорость света в воздухе.

Наиболее оптимальной программой для расчета и оптимизации электронно-перестраиваемых устройств на основе сегнетоэлектрических структур является программа CST Microwave Studio. Встроенный графический редактор CST позволяет создавать трехмерные объекты с различными диэлектрическими слоями, а топологические размеры проектируемой конструкции можно задавать переменными величинами, что особенно важно для оптимизации структуры. Расчеты с помо-

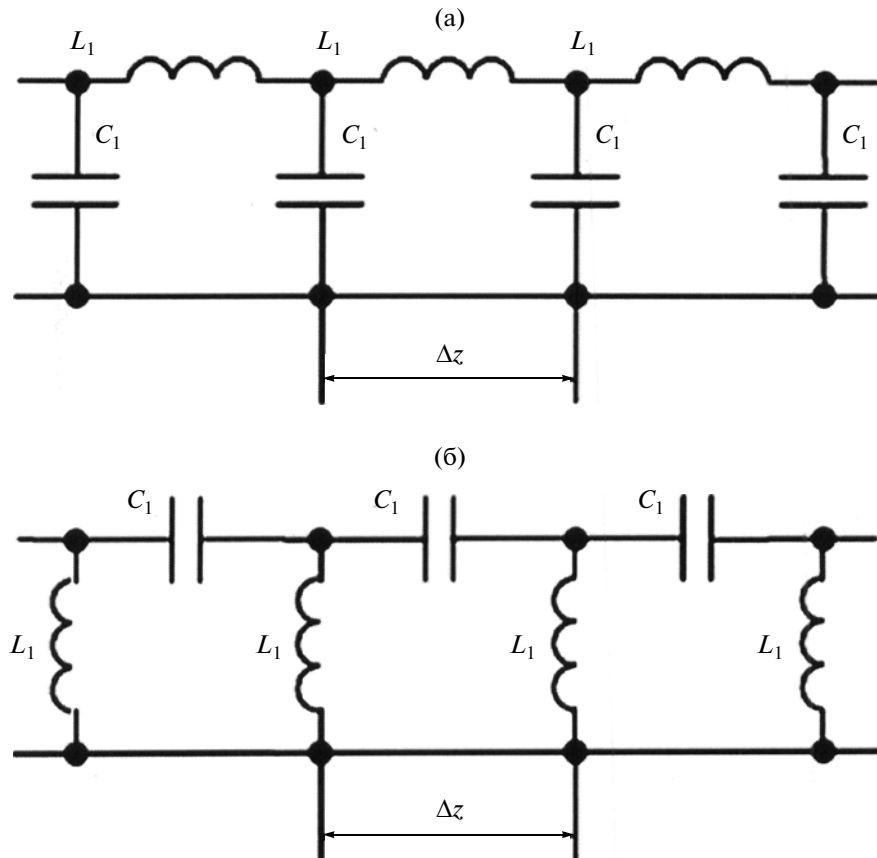


Рис. 4. Эквивалентная схема, состоящая из фазосдвигающих ячеек с положительной (а) и отрицательной (б) фазовой скоростью.

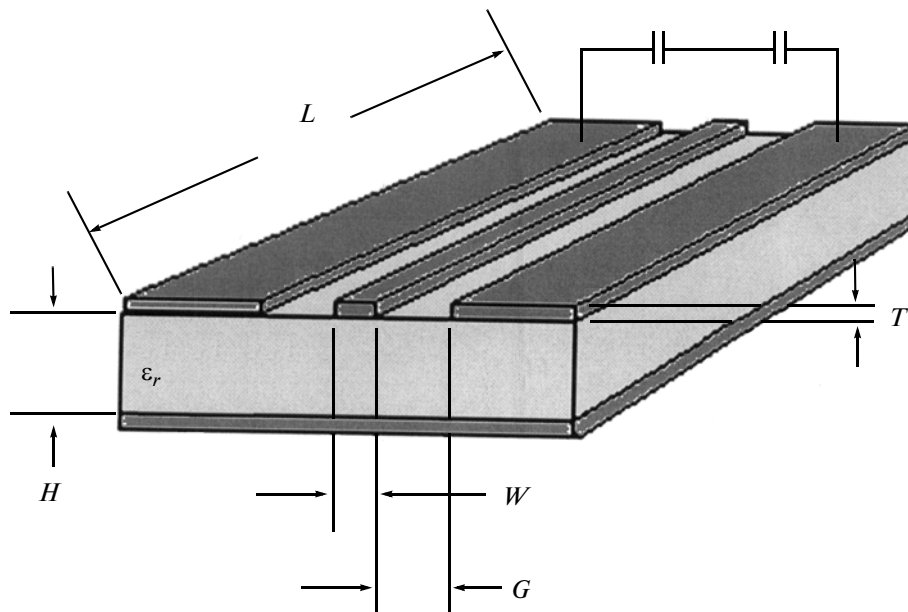


Рис. 5. Конструкция копланарной линии задержки: T – толщина металлического проводника, W – ширина среднего проводника, G – ширина щели между проводниками, H – толщина подложки, ϵ_r – диэлектрическая проницаемость подложки, L – длина КМЛ.

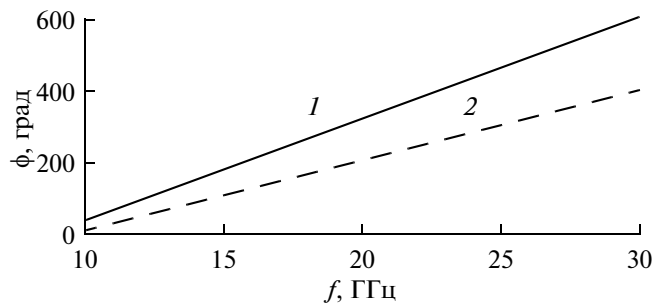


Рис. 6. Зависимость фазового сдвига копланарной линии при нулевом потенциале смещения. Ширина центрального проводника $w = 20$ мкм при толщине 2 мкм, $\epsilon_{эф} \approx 70$ (1), 25 (2). Ширина диэлектрического зазора (G) 14 и 19 мкм.

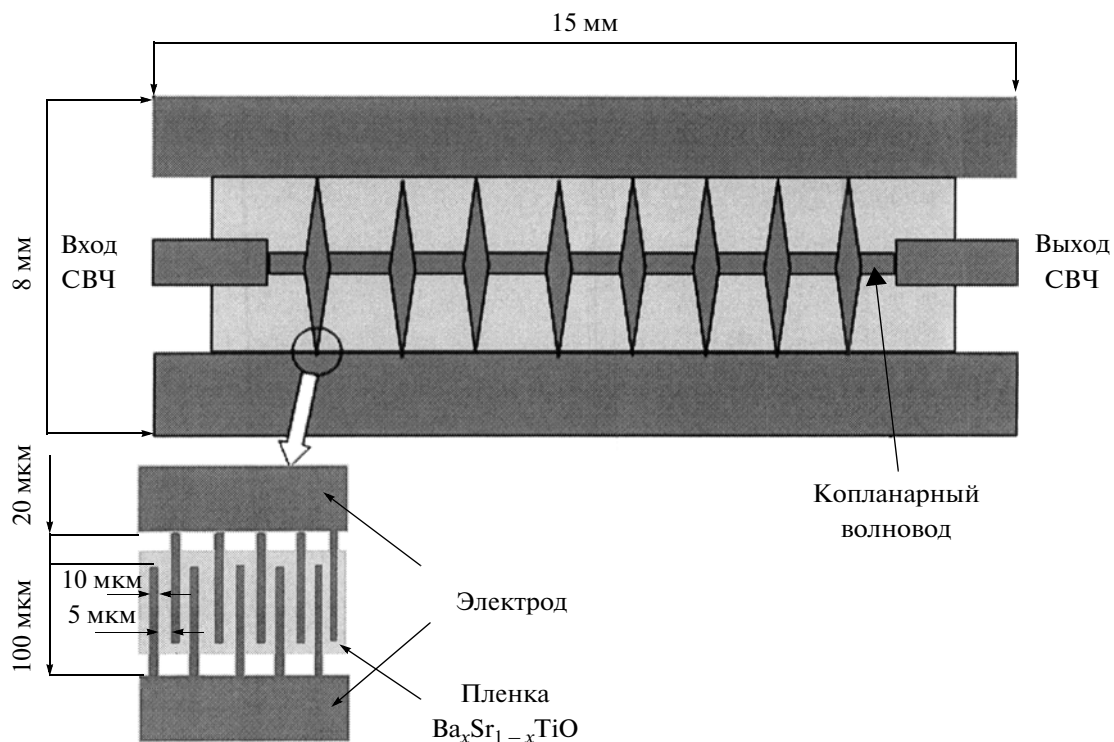


Рис. 7. Топология линии задержки СВЧ-диапазона и ее основных узлов.

шью этой программы показывают, что при использовании копланарной линии на подложке MgO толщиной 0,5 мм с осажденной сегнетоэлектрической пленкой $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ толщиной 0,06 мкм фазовый сдвиг (ϕ_{21}) на частоте 20 ГГц составляет 350° (рис. 6).

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании теоретических расчетов нами спроектирована и создана линия задержки СВЧ-диапазона на основе копланарной линии с сосредоточенными планарными конденсаторами переменной емкости (рис. 7). Линия задержки реализована

на гетероструктуре $MgO-Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ с толщиной сегнетоэлектрической пленки ($Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$) не более 70 нм. Структурно-совершенные монокристаллические пленки $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ осаждались на технологической установке «ПЛАЗМА-50 СЭ» распылением стехиометрической мишени состава $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ по методике, описанной в работе [12].

На рис. 8 представлены результаты измерения времени задержки и прямых потерь. Прямые потери в диапазоне частот 20...35 ГГц не превышали 10 дБ, а время задержки при изменении управляющего напряжения от 0 до 30 В/мкм составляло более 90 нс.

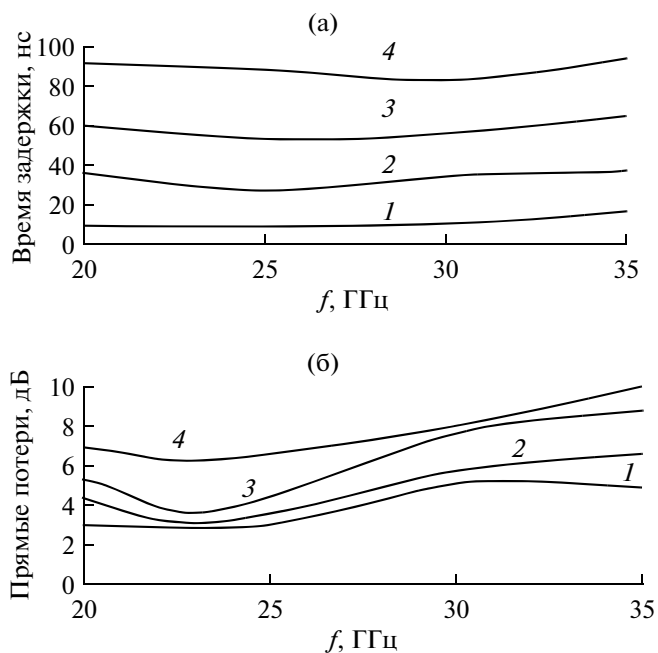


Рис. 8. Время задержки при различном напряжении смещения (а) и прямые потери в линии задержки (б): 0 (1), 10 (2), 20 (3) и 30 В/мкм (4).

Для уменьшения вносимых потерь следует провести дополнительную оптимизацию конструкции, а также использовать в качестве токоведущих электродов металл с более высокой проводимостью, например, медь, прокрытую золотом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, созданы экспериментальные образцы ЛЗ, прямые потери СВЧ-сигнала в которых составили не более 10 дБ в диапазоне частот

20...35 ГГц. Реализация низких потерь достигалась путем изготовления копланарной линии и планарных конденсаторов из пленок состава $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ толщиной до 70 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 16.513.11.3072), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-07-00662-а), Президиума Российской академии наук (программы фундаментальных исследований “Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. 2-е изд. М.: Энергия, 1977.
2. Поплавко Ю.М. // РЭ. 1962. Т. 7. № 8. С. 1458.
3. Поплавко Ю.М. // Радиотехника. 1963. Т. 18. № 10. С. 22.
4. Di Domenlco M., Johnson D.A., Pantell R.H. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. № 5. P. 1697.
5. Johnson K.M. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. № 9. P. 2826.
6. Петров В.М. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 3. Детали и компоненты. 1963. Вып. 9. С. 56.
7. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием. М.: Сайнс-Пресс, 2002.
8. Липчинский А.Г. // Микроэлектроника. 1974. Т. 3. № 2. С. 154.
9. Hamano T., Townner D.J., Wessels B.W. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. № 25. P. 5274.
10. Suherman P.M., Jackson T.J., Tse Y.Y., Jones I.P., Chakalova R.I., Lancaster M.J., Poch A. // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. № 10. P. 104101-1.
11. Weil C., Jakoby R. // IEEE – MTT/AP German Newsletter. 2002. V. 6. № 16. P. 1.
12. Афанасьев М.С., Иванов М.С. // ФТТ. 2009. Т. 51. № 7. С. 1259.