

06;09;12

Применение наноразмерных пленок титаната бария–стронция для перестраиваемых сверхвысокочастотных устройств

© Вас.М. Мухортов, С.И. Масычев, Ю.И. Головки, А.В. Чуб, В.М. Мухортов

Южный научный центр РАН,
344006 Ростов-на-Дону, Россия
e-mail: muhortov@ip.rsu.ru

(Поступило в Редакцию 31 января 2006 г.)

Впервые применены наноразмерные (≈ 20 nm) пленки для электронно-перестраиваемого микрополоскового СВЧ-устройства. Экспериментально показано, что при изменении управляющего напряжения смещения в пределах от 0 до 15 V собственная добротность микрополоскового резонатора превышает величину 100, которая изменяется незначительно при перестройке резонансной частоты 2.6 в полосе 0.3 GHz.

PACS: 84.40.-x, 81.07.-b

Введение

Тонкие пленки титаната бария–стронция $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ в последнее время интенсивно исследуются, поскольку наличие в них диэлектрической нелинейности позволяет создавать электронно-перестраиваемые СВЧ-устройства [1]. Среди таких устройств следует выделить фазированные антенные решетки (ФАР) с электронным сканированием по азимуту и высоте [2], перестраиваемые гетеродины с низким уровнем фазового шума [3], перестраиваемые фильтры [4] и параметрические усилители [5]. Применение тонкопленочных аналоговых фазовращателей в адаптивных дуплексорах цифровых систем мобильной связи позволяет снизить уровень шума в полосе частот приемного канала на 20 dB [6]. На базе тонких сегнетоэлектрических пленок созданы полифункциональные перестраиваемые устройства, в которых в единой микрополосковой конструкции совмещены фильтр и фазовращатель [7]. В последние годы при разработке диаграммообразующих устройств ФАР нового поколения предпочтение отдается фазовращателям (основной элемент антенны) с сегнетоэлектрическими варакторами на основе планарной топологии электродов. В таких отражательных антеннах массогабаритные характеристики по сравнению с аналогами на ферритах улучшаются на два порядка и на столько же понижаются энергетические затраты в цепях управления [2,8].

Основной проблемой при разработке электронно-перестраиваемых устройств на основе сегнетоэлектрических пленок являются достаточно высокие вносимые потери и управляющие напряжения. Снижение потерь обычно достигается двумя способами — использованием сегнетоэлектрика в паразитической фазе (твердые растворы $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ при $x < 0.6$) и повышением структурного совершенства пленок. Толщина обычно используемых в управляемых устройствах сверхвысокочастотного диапазона пленок больше $0.5 \mu\text{m}$, которые выращиваются по механизму трехмерного зарождения с формированием столбчатой структуры. Морфология поверхности таких пленок даже в монокри-

сталлическом состоянии обладает значительным поверхностным рельефом, что не позволяет создавать планарные электроды с диэлектрическими зазорами менее $1 \mu\text{m}$. В настоящей работе использованы иные подходы. Во-первых, применяются пленки в сегнетоэлектрической фазе $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ при $x = 0.8$). Во-вторых, используется новый способ осаждения монокристаллических пленок, позволяющий реализовывать слоевой механизм роста с атомарно гладкой морфологией поверхности, благодаря чему существенно улучшилось не только структурное совершенство пленок, но и уменьшилась ширина диэлектрического зазора в планарных электродах до величины менее $1 \mu\text{m}$. В-третьих, используются пленки наноразмерной толщины с высоким структурным совершенством для уменьшения диэлектрических потерь.

Экспериментальные данные

При разработке электронно-управляемых устройств на основе сегнетоэлектрических пленок, как правило, применяются резонансные цепи, реализованные на отрезках микрополосковых линий (несимметричных, копланарных, связанных и т.д.). Важнейшей характеристикой, определяющей возможность использования резонансного элемента, является его ненагруженная (собственная) добротность. В большинстве конструкций перестройка резонатора, фильтра или управление фазовым сдвигом достигаются путем изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического варактора (нагружающего микрополосковую линию передачи) под действием постоянного поля смещения. При этом собственная добротность (Q_0) варакторов при изменении диэлектрической проницаемости не должна существенно уменьшаться, а должна быть не ниже добротности микрополосковых линий передачи. Повышение Q_0 микрополосковых резонансных элементов, сопряженных с варакторами, до значений выше 100 позволит уменьшить вносимые потери сегнетоэлектрического фазовращателя

до уровня 2 dB [8]. Такой уровень вносимых фазовращателем потерь позволит вдвое сократить число элементов в сегнетоэлектрической ФАР [9] при сохранении требуемых характеристик.

Использование наноразмерных (< 50 nm) сегнетоэлектрических пленок, по нашему мнению, приведет к снижению диэлектрических потерь даже при использовании пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$, которые при рабочих температурах находятся в сегнетоэлектрической фазе. Как было показано нами ранее [10], наноразмерные пленки по своим свойствам радикально отличаются от более толстых пленок в связи с формированием в них нового типа доменной структуры, которая обусловлена сильным влиянием механических напряжений в системе сегнетоэлектрическая пленка—подложка. При толщине менее 50 nm в пленке действуют двумерные растягивающие напряжения за счет несоответствия параметров решетки и подложки. При толщине пленки более 100 nm растягивающие напряжения сменяются напряжениями сжатия за счет различия в коэффициентах теплового расширения пленки и подложки. В интервале от 20 до 100 nm следует ожидать появления новых свойств, обусловленных появлением новых доменных фаз [10].

Технология осаждения пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ на полированные срезы (100) MgO и методы контроля процессов роста пленок были приведены нами в [10,11]. Принципиальное отличие способа осаждения от известных аналогов состоит в том, что рост монокристаллических пленок с атомарно-гладкой поверхностью происходит из наночастиц сложного оксида, образующихся в плазме высокочастотного разряда за счет нестандартной конструкции распылительного узла и режимов создания плазмы. Именно это позволило создать пленки наноразмерной толщины, пригодные для проведения исследований. Они характеризуются атомарно-гладкой морфологией поверхности, плотность винтовых дислокаций не превышает 10^7 cm^{-2} . Высокое структурное совершенство и слоевой механизм роста позволил провести полный рентгеноструктурный анализ, начиная с толщины пленки 6 nm. Возникновение новой доменной структуры подтверждено рентгеноструктурными и радиофизическими исследованиями. Структурное совершенство пленок, факт гетероэпитаксиального роста и ориентационные соотношения между пленкой и подложкой устанавливались рентгенографированием на дифрактометре ДРОН-4-07. Типичная полуширина рефлексов (002) для пленок толщиной больше 20 nm составляла меньше 20 угловых минут, полуширина отражений типа (113), по которым определялась азимутальная разориентировка, была меньше 30 угловых минут. Установлена критическая (50–70 nm) толщина монокристаллических пленок титаната бария—стронция на подложке из окиси магния, выше которой происходит резкое изменение параметра решетки пленки как в перпендикулярном (параметр увеличивается) подложке направлении, так и в тангенциальном (параметр уменьшается). Причем как в области толщин пленки ниже

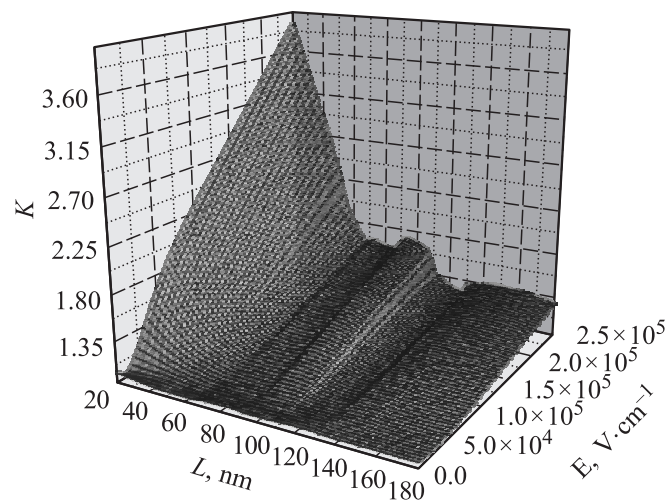


Рис. 1. Зависимость коэффициента управляемости от толщины пленок и подводимого постоянного напряжения.

критической, так и выше, параметры решетки пленки остаются неизменными, но существенно большими, чем в массивном материале.

В области толщин пленок 20–50 nm нами обнаружена аномально высокая диэлектрическая проницаемость $\epsilon > 4000$ при значениях диэлектрических потерь $\text{tg } \delta < 0.002$. Измерения ϵ и $\text{tg } \delta$ проводилось на приборе Keitley 4200 на частоте 1 MGz с использованием зондовой станции РМ-5 Micro Tes. Зависимость коэффициента управляемости ($K = \epsilon_V / \epsilon_{V=0}$) от толщины пленок и приложенного поля показана на рис. 1. Для измерений диэлектрической проницаемости на поверхности пленок формировались планарные конденсаторы с алюминиевыми встречно-штыревыми электродами толщиной $\sim 0.3 \mu\text{m}$. Атомарно-гладкая поверхность монокристаллических пленок позволила создавать планарные встречно-штыревые электроды с диэлектрическим зазором между штырями 0.7 при ширине штыря 0.7 и длине $180 \mu\text{m}$, а общее количество штырей в планарном конденсаторе равнялось 150. Геометрические размеры планарных конденсаторов определялись с помощью микроскопа „Leitz Latimet“.

Из приведенной на рис. 1 зависимости видно, что оптимальные значения толщин пленок находятся в области 20–30 nm, для которых $K > 2.5$ при полях $\approx 10^5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Для оценки величины собственной добротности резонансных элементов, сопряженных с варакторами на основе наноразмерных пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$, разработан микрополосковый резонатор, топология которого приведена на рис. 2.

Для резонатора, нагруженного с двух сторон, имеет место соотношение

$$1/Q_L = 1/Q_0 + 1/Q_{in1} + 1/Q_{in2}, \quad (1)$$

где Q_L — нагруженная добротность, Q_{in1} и Q_{in2} — входная и выходная добротности резонатора. Нагруженная

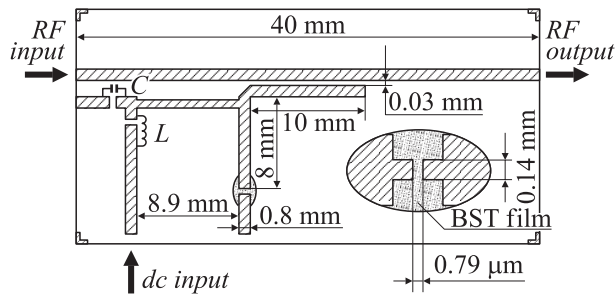


Рис. 2. Топология микрополоскового резонатора.

добротность определяется следующим образом:

$$Q_L = f_0 / (\Delta f)_{3\text{dB}}, \quad (2)$$

где f_0 — резонансная частота резонатора, а $(\Delta f)_{3\text{dB}}$ — ширина полосы частот, отсчитанная по уровню 3 dB относительно затухания на резонансной частоте. Затухание, вносимое резонатором на частоте резонанса, равно

$$L_0 = 10 \lg(Q_{\text{in}1} Q_{\text{in}2}) / (4Q_L^2) \text{ [дБ]}. \quad (3)$$

Выражения (1)–(3) применяются независимо от вида резонатора и конструкции входной и выходной связей. При сильной связи, т.е. при низких значениях $Q_{\text{in}1}$ и $Q_{\text{in}2}$ и высокой собственной добротности Q_0 , потери на проход на резонансной частоте невелики и нагруженная добротность Q_L значительно отличается от собственной добротности Q_0 . При уменьшении связи, т.е. при увеличении $Q_{\text{in}1}$ и $Q_{\text{in}2}$ в соответствии с (1) Q_L стремится к значению Q_0 , величина вносимых потерь при этом значительно возрастает, хотя собственная добротность самого резонатора при этом остается неизменной. Такой режим представляет интерес, поскольку позволяет по измеренным значениям нагруженной добротности Q_L и вносимых потерь на частоте резонанса L_0 легко найти собственную добротность резонатора. Действительно, если вход и выход резонатора симметричны, т.е. $Q_{\text{in}1} = Q_{\text{in}2}$, а $L_0 > 20 \text{ dB}$, то из соотношений (1)–(3)

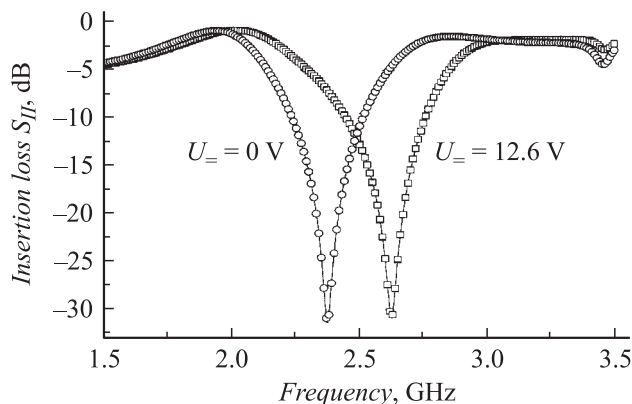


Рис. 3. Частотные характеристики микрополоскового резонатора, сопряженного с сегнетоэлектрическим варактором.

следует, что $Q_L \approx Q_0$ (в этом случае, измерив нагруженную добротность Q_L можно сразу оценить величину Q_0). В этой связи параметры микрополоскового резонатора были оптимизированы таким образом, чтобы его входная и выходная добротности были одинаковы, а уровень вносимых потерь на резонансной частоте превышал 20 dB. Оптимизированные размеры микрополоскового резонатора показаны на рис. 2.

На рис. 3 приведены измеренные (Anritsu MS4623B) частотные характеристики реализованного микрополоскового резонатора, сопряженного с сегнетоэлектрическим варактором. Величина нагруженной добротности резонатора рассчитана с помощью соотношения (2) и составляет 118 и 115 при напряжении смещения 0 и 12.6 V соответственно. Собственная добротность резонатора Q_0 незначительно превышает измеренные в этом режиме значения нагруженной добротности.

Выводы

Результаты проведенных измерений свидетельствуют, что собственная добротность компонентов, реализованных на основе наноразмерных тонких пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ толщиной меньше 30 nm, достигает величин, необходимых для разработки перестраиваемых СВЧ-устройств, по своим характеристикам превосходящим традиционные аналоги. Используемая методика измерения нагруженной добротности микрополоскового резонатора, сопряженного с сегнетоэлектрическими компонентами, позволяет проводить оценку величины собственной добротности сегнетоэлектрических компонент в режиме их перестройки под действием напряжения смещения. Установлено, что при изменении управляющего напряжения смещения в пределах от 0 до 15 V собственная добротность микрополоскового резонатора, сопряженного с варакторами, реализованными на основе наноразмерных тонких пленок $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ толщиной 18 nm, практически остается неизменной с $Q_0 > 100$. Использование таких варакторов на основе наноразмерных пленок титаната бария–стронция позволит снизить вносимые потери в перестраиваемых СВЧ-устройствах до приемлемого уровня и существенно улучшит их характеристики.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 05-02-17191, № 05-07-08001.

Список литературы

- [1] Vendik O.G. // Integrated Ferroelectrics. 2002. Vol. 49. P. 181–190.
- [2] Van Keuls F.W., Romanofsky R.R., Miranda F.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71. N 21. P. 3075–3077.
- [3] Xu H., Pervez N.K., Hansen P.J. et al. // IEEE Electron Device Lett. 2004. Vol. 25. N 2. P. 49–51.
- [4] Cole M.W., Joshi P.C., Ervin M.H. et al. // Thin Solid Films. 2000. Vol. 374. P. 34–41.

- [5] *Chang W., Horwitz J., Carter A.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 74. N 7. P. 1033–1035.
- [6] *O'Sullivan T., York R., Noren B.* et al. // *IEEE Trans on MTT.* 2005. Vol. 53. N 1. P. 106–114.
- [7] *Vendik I., Pleskachev V., Vendik O.* // *Progress in Electromagnetics Research Symp.* Hangzhou, China, 2005. P. 1–4.
- [8] *Acikel B., Taylor T.R., Hansen P.J.* et al. // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters.* 2002. Vol. MTT-12. P. 237–239.
- [9] *Romanofsky R.R., Van Keuls F.W., Warner J.D.* et al. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 2000. Vol. 603. P. 3–14.
- [10] *Мухортов В.М., Головки Ю.И., Колесников В.В.* и др. *Письма ЖФТ.* 2005. Т. 31. Вып. 23. С. 75–80.
- [11] *Mukhortov V.M., Golovko Y.I., Tolmachev G.N.* et al. // *Ferroelectrics.* 2000. Vol. 247. N 1–3. P. 75–83.