

05:09:12

©1993 г.

ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУР ВТСП-СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК В ОХЛАЖДАЕМЫХ СВЧ ФАЗОВРАЩАТЕЛЯХ

И.Б.Вендик, Л.Т.Тер-Мартirosян

Рассматривается возможность создания СВЧ фазовращателей на основе диэлектрической нелинейности титаната стронция с проводящими поверхностями из высокотемпературного сверхпроводника. Проведены оценки коэффициента качества фазовращателя на основе структур ВТСП-сегнетоэлектрик. Сравнение предлагаемого фазовращателя с полупроводниковым и сверхпроводниковым аналогами показывает перспективность сегнетоэлектрического устройства.

Введение

С начала 60-х годов внимание исследователей привлекали нелинейные диэлектрики как основа для создания широкого спектра СВЧ приборов с электрическим управлением [1]; диэлектрическая проницаемость таких материалов зависит от приложенного к материалу электрического поля. В последующие годы основное внимание уделялось сегнетоэлектрическим фазовращателям (ФВ) с электрическим управлением на частотах 10...100 ГГц [2-4].

Сегнетоэлектрические ФВ отличаются высоким быстродействием, высокой радиационной стойкостью, простотой реализации в интегральном исполнении [1,4]. Эти качества делают сегнетоэлектрические ФВ весьма привлекательными для реализации фазированных антенных решеток (ФАР) с большим числом элементов, при этом к ФВ предъявляются обычно дополнительные требования: низкое потребление энергии в цепях управления и (для приемных ФАР) низкий коэффициент шума.

До настоящего времени все разработки сегнетоэлектрических ФВ были ориентированы на их работу при температуре ~ 300 К. При этом условия практического единственного материалом, обладающим относительно низкими потерями в диапазоне СВЧ при достаточной диэлектрической нелинейности, является твердый раствор $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$.

Базовыми элементами сегнетоэлектрических СВЧ устройств являются трехслойная структура электрод-сегнетоэлектрик-электрод, представляющая собой плоский конденсатор либо несимметричную микрополосковую линию, и двухслойная структура, образованная двумя электродами, нанесенными на слой сегнетоэлектрика и разделенными узким

(~ 1 мкм) зазором, представляющая собой планарный конденсатор либо щелевую линию [1]. При этом в СВЧ устройствах используются тонкие (~ 1 мкм) сегнетоэлектрические слои, навесенные на подложку.

Все реализованные пленки $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ и устройства на их основе отличались слишком большими потерями, так что ФВ на таких пленках не могли конкурировать с полупроводниковыми аналогами.

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости привело к созданию сверхпроводниковых материалов, работающих при температуре кипения жидкого азота (~ 77 К) и обеспечивающих в диапазоне СВЧ приблизительно на порядок меньшие потери, чем при использовании нормальных металлов [5]. Появилось новое самостоятельное направление — электроника азотного уровня температур [6]. Достижения в области оксидных сверхпроводниковых пленок вызывают новый интерес к сегнетоэлектрическим эпитаксиальным слоям.

Реализация СВЧ устройств, работающих при температуре кипения жидкого азота, позволяет использовать в сегнетоэлектрических ФВ низкотемпературные сегнетоэлектрики, отличающиеся низкими потерями в диапазоне СВЧ. Здесь прежде всего следует упомянуть достаточно хорошо изученный титанат стронция SrTiO_3 . Кроме того, преимущества охлаждаемых сегнетоэлектрических СВЧ устройств, использующих структуры ВТСП-сегнетоэлектрик при температуре кипения жидкого азота, определяются следующими факторами: снижение приблизительно на порядок потерь в проводящих поверхностях [5]; снижение потерь в сегнетоэлектрике за счет уменьшения областей, занимаемых объемным зарядом [7]; обеспечение термостабилизации.

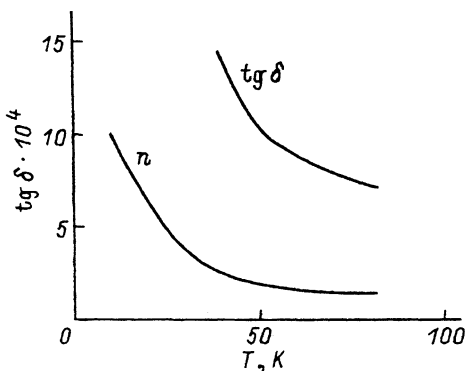
Таким образом, создание ФВ на основе титаната стронция с проводящими поверхностями из ВТСП открывает новые горизонты в технике СВЧ [8].

Целью настоящей работы является оценка потенциальных возможностей охлаждаемых сегнетоэлектрических ФВ СВЧ на основе структур высокотемпературный сверхпроводник $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ -титанат стронция SrTiO_3 .

Эффективность управления фазой электромагнитной волны в сегнетоэлектрическом слое

Будем полагать, что основу ФВ составляют структуры, состоящие из высококачественных монокристаллических эпитаксиальных слоев сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и сегнетоэлектрика SrTiO_3 с резкой границей между ними.

Монокристаллы титаната стронция при 77 К отличаются весьма низкими потерями в диапазоне СВЧ [9] при значительной диэлектрической нелинейности [10]. К сожалению, надежные данные о диэлектрической нелинейности кристаллов титаната стронция в температурном интервале 40...80 К в литературе отсутствуют. С помощью известных экспериментальных данных [10] можно оценить значения отношения диэлектрической проницаемости титаната стронция при отсутствии поля смещения $\epsilon_{\text{max}} = \epsilon(0)$ и в поле напряженностью $2.5 \cdot 10^6$ В/м (управляемость)



Температурные зависимости $\text{tg } \delta$ на частоте 10 ГГц и управляемости n монокристаллического титаната стронция [9,10].

$n = \varepsilon(0)/\varepsilon (2.5 \cdot 10^6 \text{ В/м})^1$ в интервале 40...80 К (см. рисунок). Тангенс угла диэлектрических потерь монокристаллического титаната стронция в диапазоне СВЧ (см. рисунок) прямо пропорционален частоте, а дисперсия диэлектрической проницаемости практически отсутствует вплоть до 100 ГГц [3,9].

Рассмотрим случай *ТЕМ*-волны, распространяющейся в диэлектрической среде. При этом мы пока не будем учитывать потери, вносимые электродами, необходимыми для канализации волны и обеспечения управления фазой волны изменением поля смещения.

Затухание электромагнитной волны на единицу длины в диэлектрической среде с потерями, характеризуемыми $\text{tg } \delta$, определяется выражением

$$\alpha = 27.3 \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\lambda_0} \text{tg } \delta, \quad (1)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость среды, λ_0 — длина волны в вакууме.

Под действием поля смещения диэлектрическая проницаемость материала уменьшается, при этом возможен некоторый рост $\text{tg } \delta$ [1]. Для упрощения будем считать, что затухание α не зависит от напряженности поля смещения.

Изменение диэлектрической проницаемости среды приводит также к изменению длины волны и, следовательно, к изменению набега фазы на заданной длине; этот управляемый фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ и является полезным эффектом. При уменьшении диэлектрической проницаемости от ε_{max} до $\varepsilon_{\text{max}}/n$ фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ на длине L равен

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_{\text{max}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{n}}\right). \quad (2)$$

Рассмотренный случай распространения электромагнитной волны в однородной среде близок к реализуемым на практике щелевым или копланарным линиям на поверхности тонкого слоя сегнетоэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью, нанесенного на диэлектрическую

¹ Увеличение напряженности поля смещения выше $2.5 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ приведет к некоторому дополнительному снижению диэлектрической проницаемости, т.е. к увеличению n .

T, К	Коэффициент качества, M	
	10 ГГц	100 ГГц
40	$4.6 \cdot 10^5$	4600
50	$4.2 \cdot 10^5$	4200
60	$3.2 \cdot 10^5$	3200
70	$3.1 \cdot 10^5$	3100
80	$3.0 \cdot 10^5$	3000

подложку с низкой проницаемостью [1]; толщина слоя сегнетоэлектрика по порядку величины должна соответствовать ширине зазора между электродами. На частотах ниже 10 ГГц целесообразно использовать сосредоточенные элементы — планарные конденсаторы на основе пленки сегнетоэлектрика [1].

Для оценки эффективности управления фазой отрезком линии с сегнетоэлектрическим слоем используем параметр Q , называемый добротностью управляющего элемента и определяемый как отношение фазового сдвига к величине средних потерь в децибелах на длине L [11]

$$Q = \frac{\Delta\varphi}{\alpha_{\text{ср}}}. \quad (3)$$

Здесь $\Delta\varphi$ определяется выражением (2), а средние потери в соответствии с (1)

$$\alpha_{\text{ср}} = 27.3 \sqrt{\text{tg } \delta_1 \cdot \text{tg } \delta_2} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{max}}^2}{n} \frac{L}{\lambda_0}}, \quad (4)$$

где значения $\text{tg } \delta_1$ и $\text{tg } \delta_2$ соответствуют отсутствию поля смещения и максимальному полю.

Другим универсальным параметром, который принято использовать для количественной оценки управляющих свойств элементов СВЧ микросхем, является коммутационное качество M [12]. Для ФВ на сегнетоэлектрике коэффициент качества определяется выражением [3,11]

$$M = \frac{(n-1)^2}{n \cdot \text{tg } \delta_1 \cdot \text{tg } \delta_2}. \quad (5)$$

Сопоставляя выражения (2)–(5), получаем соотношение между добротностью и коэффициентом качества, которое при $1.1 \leq n \leq 3$ описывается простым соотношением

$$M \simeq 75Q^2. \quad (6)$$

Пренебрегая небольшим увеличением $\text{tg } \delta$ при наличии поля смещения и используя данные, приведенные на рисунке, легко по формуле (5) рассчитать значения коэффициента качества ФВ на основе титаната стронция на частотах 10 и 100 ГГц в интервале температур 40...80 К (см. таблицу). При этом средние потери, вносимые нелинейным диэлектриком при изменении фазы на 360° , составляют на частоте 10 ГГц $\alpha_{\text{ср}} \simeq 0.1$ дБ, а на частоте 100 ГГц ~ 1 дБ.

Конструктивным параметром $\Phi В$ является длина линии, по которой распространяется электромагнитная волна. Длина пути электромагнитной волны, необходимая для обеспечения управляемого фазового сдвига, равного 360° , в соответствии с (2) определяется выражением

$$L(2\pi) = \lambda_0 \left[\sqrt{\epsilon_{\max}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{n}} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

и составляет $(0.04 \dots 0.09) \lambda_0$.

Затухание, вносимое электродами

В реальной конструкции $\Phi В$ всегда присутствуют электроды, формирующие линию передачи и обеспечивающие приложение к сегнетоэлектрику поля смещения для управления фазой электромагнитной волны [1]. Наличие металлических электродов, в особенности когда они расположены на диэлектрическом материале с весьма большой проникаемостью, приводит к появлению дополнительных потерь в устройстве.

Расчетная оценка затухания, обусловленного электродами, затруднена необходимостью учета большого количества плохо контролируемых факторов, связанных с технологией сегнетоэлектрических и проводниковых слоев, с конфигурацией электродов и т.п.

Исходя из имеющегося опыта [1], можно предполагать, что электроды из нормального металла в сегнетоэлектрическом $\Phi В$ могут вносить затухание до нескольких децибелл на 360° фазового сдвига на частоте 100 ГГц.

Электроды из ВТСП $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ обеспечат снижение потерь при рабочей температуре $\Phi В$ меньше критической температуры T_c (для $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ $T_c \simeq 91$ К). Имеются основания ожидать, что затухание, вносимое сверхпроводящими электродами $\Phi В$ на частоте 100 ГГц, можно снизить до $2 \dots 3$ дБ на 360° фазового сдвига. При этом добротность уменьшится в $2 \dots 3$ раза, а коэффициент качества в соответствии с (6) уменьшится в $4 \dots 10$ раз по сравнению с оценками, приведенными в таблице.

Влияние электродов проявляется также в том, что в случае электродов из нормального металла в титанате стронция образуются области с объемным зарядом [13], поле которого снижает эффективную диэлектрическую нелинейность структуры и вызывает повышение диэлектрических потерь в сегнетоэлектрике (за счет наведенного пьезоэффекта). Свидетельством наличия объемного заряда является несимметричность вольт-фарадной характеристики емкостной структуры [13,14].

Как следует из экспериментальных данных [7], применение в качестве электродов ВТСП $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ предотвращает образование объемного заряда в титанате стронция; при этом СВЧ потери в сегнетоэлектрике должны уменьшиться.

Таким образом, имеются основания предполагать, что затухание на 360° фазового сдвига в $\Phi В$ на основе монокристаллических эпитаксиальных структур $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ - $SrTiO_3$ не будут превышать $3 \dots 4$ дБ на частоте 100 ГГц, соответственно коэффициент качества будет лежать в пределах $10^2 \dots 10^3$.

Проведем сравнение обсуждаемого сегнетоэлектрического ФВ с ФВ, основанными на других принципах, по эффективности управления фазой и по быстродействию.

В настоящее время наибольшее распространение получили полупроводниковые ФВ. Коэффициент качества полупроводникового $p-i-n$ -диода — основного элемента современных интегральных схем ФВ составляет $\sim 10^4$ на частоте 10 ГГц и уменьшается с ростом частоты; на частоте 100 ГГц коэффициент качества диода $10^2 \dots 10^3$. Приведенные выше оценки показывают, что ФВ на основе монокристаллических эпитаксиальных структур $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}\text{-SrTiO}_3$ характеризуется коэффициентом качества того же порядка. Однако ФВ на $p-i-n$ -диодах уступает сегнетоэлектрическому ФВ по быстродействию, поскольку время переключения диода определяется временем рассасывания неосновных носителей заряда в i -области; у современных $p-i-n$ -диодов время переключения порядка $10^7 \dots 10^8$ с [15], в то время как у сегнетоэлектрических ФВ время переключения не более $10^{-9} \dots 10^{-10}$ с [1].

Не уступает по быстродействию сегнетоэлектрическому ФВ предложенный недавно охлаждаемый дискретный ФВ, управляющим элементом которого служит ВТСП ключ, выполненный в виде сосредоточенного элемента в форме меандра [16]. Под влиянием внешнего воздействия в виде управляющего тока (постоянного или импульсного) ключ переходит из сверхпроводящего в нормальное состояние, при этом его сопротивление резко возрастает. Длительность перехода не превышает 10^{-10} с [17]. Оценка коэффициента качества такого ключа на основе пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ дает значение $10^3 \dots 10^4$ на частоте 60 ГГц при температуре, вдвое меньше критической [18]. Успехи в технологии пленок ВТСП привели к значительному снижению их поверхностного сопротивления на СВЧ в сверхпроводящем состоянии [5], что соответствует увеличению коэффициента качества ключа в несколько раз. Таким образом, ФВ на сверхпроводниковых ключах может обеспечить те же значения параметров, что и сегнетоэлектрический ФВ. Эти два типа ФВ могут дополнять друг друга в охлаждаемых интегральных схемах СВЧ.

Проблемы технологии

Технология нанесения сегнетоэлектрических пленок и пленок ВТСП на диэлектрическую подложку, в том числе с использованием так называемого буферного слоя, предотвращающего взаимную диффузию атомов пленки и подложки, к настоящему времени в достаточной степени отработана.

Вместе с тем еще очень слабо изучены процессы, происходящие в подслое при нанесении на него верхнего слоя; эти процессы играют важнейшую роль при реализации многослойных структур. Так, нанесение пленки ВТСП на титанат стронция изменяет в последнем свойства приповерхностного слоя [7]; нанесение пленки сегнетоэлектрика на слой ВТСП также изменяет свойства приповерхностного слоя в сверхпроводнике [19]. Следовательно, двух- и трехслойные структуры, содержащие сегнетоэлектрические и сверхпроводниковые слои, реально будут состоять из

большого числа слоев вследствие образования переходных слоев, свойства которых отличаются в худшую сторону от свойств сегнетоэлектрика и ВТСП в объемных образцах.

Целью ближайших исследований, посвященных созданию СВЧ ФВ на основе структур ВТСП-титанат стронция, должно быть выяснение процессов, связанных с образованием этих переходных слоев, и на этой основе разработка технологии, исключающей их образование либо обеспечивающей малую их толщину, чтобы наличие этих переходных слоев не сказывалось заметным образом на параметрах устройства.

Настоящая работа включена в программу "Высокотемпературная сверхпроводимость", проект № 90475.

Список литературы

- [1] Сегнетоэлектрики в технике СВЧ // Под ред. О.Г.Вендика. М.: Сов. радио, 1979. 272 с.
- [2] Вендик О.Г., Мироненко И.Г., Тер-Мартirosян Л.Т. // Изв. вузов. Физика, 1981. № 5. С. 39-52.
- [3] Вендик О.Г., Мироненко И.Г., Тер-Мартirosян Л.Т. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1987. Т. 51. № 10. С. 1748-1752.
- [4] Varadan V.K., Ghodgaonkar D.K., Varadan V.V. et al. // Microwave J. 1992. Vol. 35. N 1. P. 116-125.
- [5] Piel H., Müller G. // IEEE Trans. on Magn. 1991. Vol. 27. N 2. P. 854-863.
- [6] Вендик О.Г., Козырев А.Б., Самойлова Т.Б., Попов А.Ю. // Высокотемпературная сверхпроводимость. Фундаментальные и прикладные исследования. Л.: Машиностроение, 1990. С. 7-60.
- [7] Борисовский К.Е., Дедык А.И., Плоткина Н.В., Тер-Мартirosян Л.Т. // СФХТ. 1992. Т. 5. № 4. С. 762-765.
- [8] Wendik O.G., Ter-Martirosyan L.T., Dedyk A.I. et al. // Ferroelectrics. 1992. (to be published).
- [9] Bethe K. // Philips Res. Repts. Suppl. 1970. N 2. 146 p.
- [10] Sawaguchi E., Kikuchi A., Kodera J. // J. Phys. Soc. Jap. 1962. Vol. 17. N 10. P. 1666-1667.
- [11] Барский И.В., Вендик О.Г., Хижа Г.С. // Изв. ЛЭТИ. Вып. 375. Л., 1986. С. 3-6.
- [12] Хижа Г.С., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А. СВЧ фазовращатели и переключатели. М.: Радио и связь, 1984. 184 с.
- [13] Вендик О.Г., Дедык А.И., Дмитриева Р.В. и др. // ФТТ. 1984. Т. 26. Вып. 3. С. 684-689.
- [14] Hirano T., Uedo M., Matsui K. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1992. Vol. 31. Pt 2. N 9B. P. L1345-L1347.
- [15] Microwave J. 1992. Vol. 35. N 5. P. 225.
- [16] Vendik I.B., Kaparkov D.I., Karmanenko S.F. et al. // Proc. 22 EuMC. Microwave Exhibition and Publishers. 1992. Vol. 2. P. 1337-1341.
- [17] Chaloupka H., Jeck M., Kolesov S., Vendik O.G. // Proc. 22 EuMC. Microwave Exhibition and Publishers. 1992. Vol. 1. P. 189-194.
- [18] Vendik O.G., Gaidukov M.M., Kolesov S.G., Kozurev A.B., Popov A.Yu. Proc. 21 EuMC. Microwave Exhibition and Publishers. 1991. Vol. 1. P. 72-92.
- [19] Куприянов М.Ю., Лухарев К.К. // УФН. 1990. Т. 160. № 5. С. 49-87.

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет

Поступило в Редакцию
11 февраля 1993 г.