

06

## Деградация емкости межфазной границы SrRuO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>, индуцированная механическими напряжениями

© Ю.А. Бойков<sup>1</sup>, Т. Клаесон<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Чалмерский технический университет, Гетеборг, Швеция

E-mail: yu.boikov@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 14 мая 2014 г.)

Методом лазерного испарения выращены трехслойные эпитаксиальные гетероструктуры, в которых промежуточный слой SrTiO<sub>3</sub> толщиной в 700 нм интегрирован с двумя электродами SrRuO<sub>3</sub>. В верхнем электроде с использованием фотолитографии и ионного травления были сформированы два десятка контактных площадок ( $S \approx 0.1 \text{ mm}^2$ ). Нижний электрод SrRuO<sub>3</sub>, выращенный на подложке (001)MgO, являлся общим для всех пленочных конденсаторов на чипе. С понижением температуры в интервале 300–50 К емкость  $C$  конденсаторов возрастала более чем в два раза вследствие увеличения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  промежуточного слоя. При  $T = 4.2 \text{ K}$  уменьшение  $C$  при подаче на оксидные электроды напряжения смещения  $\pm 2.5 \text{ V}$  составляло порядка 40%. В интервале температуры 100–300 К отношение  $\epsilon_0/\epsilon$  практически линейно возрастало с температурой ( $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума). При  $T > 250 \text{ K}$  тангенс угла диэлектрических потерь промежуточного слоя SrTiO<sub>3</sub> экспоненциально возрастал с температурой и существенно зависел от напряжения смещения, поданного на оксидные электроды.

### 1. Введение

Эпитаксиальные пленки „металлических“ оксидов (рутенаты, манганиты, купратные сверхпроводники и т.д.) перспективны для использования в качестве электродов в варакторных элементах, включающих тонкие слои перовскито-подобных сегнетоэлектриков Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>TiO<sub>3</sub> (BSTO) [1,2]. Изоморфность структуры и умеренное рассогласование в параметрах кристаллических решеток способствуют эпитаксиальному росту пленок BSTO на поверхности (001)SrRuO<sub>3</sub> (SRO), (001)La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub>, (001)YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  и формированию четко ориентированных слоев указанных проводящих оксидов на поверхности сегнетоэлектрического слоя. Межфазные границы между интегрированными в многослойной структуре оксидными электродами и промежуточным слоем BSTO, как правило, резкие и свободны от включений побочных фаз [3,4].

В обширной группе проводящих оксидов, имеющих перовскито-подобную элементарную ячейку, рутенат стронция выделяется относительно высокой концентрацией носителей заряда ( $n \approx 2 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  [5]). Электронные и магнитные параметры SRO зависят от структуры и резко изменяются при нарушении стехиометрии [6,7]. Структура пленки рутената стронция определяется технологическими условиями ее формирования и рассогласованием в параметрах кристаллических решеток с подложкой.

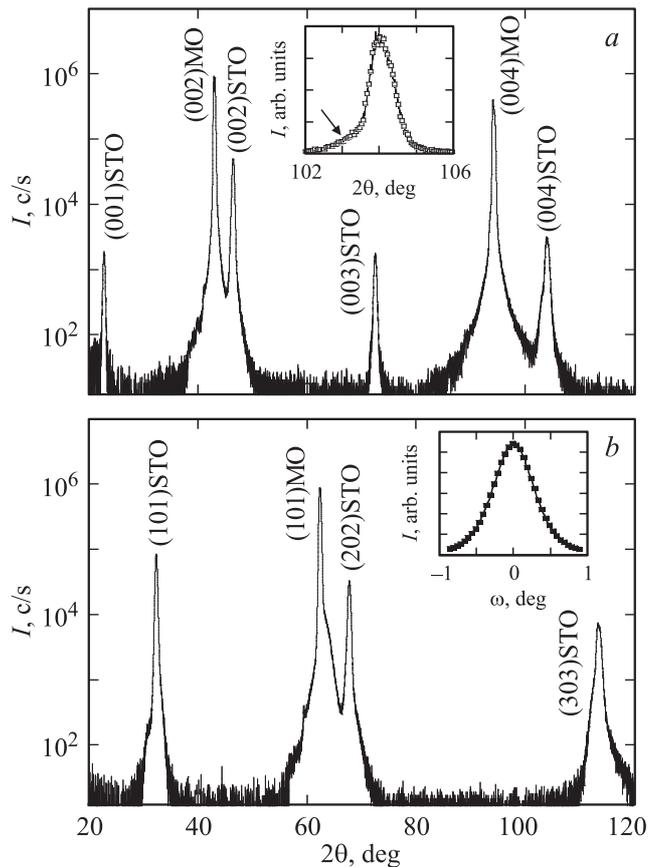
В настоящей работе исследованы температурные и полевые зависимости реальной части диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) и тангенса угла диэлектрических потерь ( $\tan \delta$ ) эпитаксиальных слоев SrTiO<sub>3</sub> (STO), ин-

тегрированных с электродами из рутената стронция в пленочных конденсаторных структурах, сформированных на подложке со значительным рассогласованием в параметрах кристаллических решеток и в температурных коэффициентах линейного расширения.

### 2. Эксперимент

Метод лазерного испарения (KrF,  $\lambda = 248 \text{ nm}$ ,  $\tau = 30 \text{ ns}$ ) был использован для формирования трехслойных гетероструктур SRO/STO/SRO на подложке (001)MgO (MO). Плотность лазерного излучения на поверхности использованных керамических мишеней SRO и STO составляла  $1.5 \text{ J/cm}^2$ . Температура подложки в процессе формирования оксидных электродов и слоя STO равнялась  $790^\circ\text{C}$ , а давление кислорода поддерживалось на уровне  $0.3 \text{ mbar}$ . Промежуточный слой STO имел толщину  $d = 700 \text{ nm}$ , а электроды из рутената стронция —  $80 \text{ nm}$ . Для монокристаллов MO характерны низкие значения диэлектрических потерь [8] при высоких частотах, это определило выбор оксида магния в качестве материала подложки.

Фазовый состав и структура выращенных трехслойных пленочных систем SRO/STO/SRO исследовались с использованием рентгеновской дифракции (Philips X'pert MRD,  $\text{CuK}\alpha_1$ ,  $\omega/2\theta$  — и  $\phi$  — сканы, кривые качания). Чтобы определить параметры элементарных ячеек в электродах SRO и промежуточном слое STO в плоскости подложки и вдоль нормали к ее поверхности  $\omega/2\theta$ -сканы измерялись в условиях, когда падающий и отраженный рентгеновские пучки находились в плоскости, нормальной к (001) MO или (101) MO (рис. 1,  $a, b$ ).



**Рис. 1.** *a)* Рентгеновская дифрактограмма ( $\omega/2\theta$ ,  $\text{CuK}\alpha_1$ ), полученная для гетероструктуры SRO/STO/SRO/(001)MO в условиях, когда падающий и отраженный рентгеновские пучки находились в плоскости, перпендикулярной плоскости подложки. На вставке показан фрагмент того же скана в окрестности пика (004)STO. Стрелкой отмечены перекрывающиеся рефлексы (004) от верхнего и нижнего электродов SRO. *b)* Рентгеновская дифрактограмма, визуализированная для той же гетероструктуры, когда падающий и отраженный рентгеновские пучки находились в плоскости, перпендикулярной (101)MO. На вставке приведена кривая качания для рентгеновского рефлекса (002)STO от выращенной гетероструктуры.

Для формирования квадратных ( $S = 330 \times 330 \mu\text{m}$ ) контактных площадок в верхней пленке рутената стронция и „окон“ в промежуточном слое STO (для обеспечения контакта с нижним, общим для всех конденсаторных структур электродом SRO), использовались фотолитография и ионное травление (Ar, 500 V, 0.2 mA). На одном чипе располагалось 20 пленочных плоско-параллельных конденсаторов.

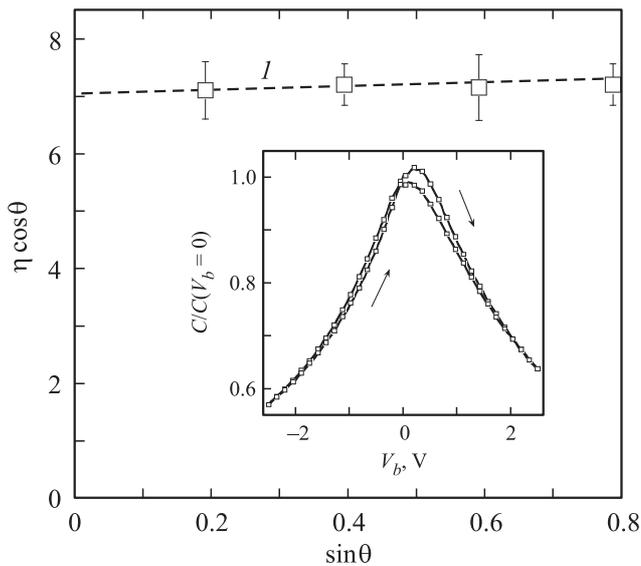
Емкость  $C$  сформированных конденсаторов измерялась с использованием прибора hp 4263A LCR meter ( $f = 10\text{--}100 \text{ kHz}$ ), при подаче на электроды напряжения смещения  $V_b$  до  $\pm 2.5 \text{ V}$  и без него ( $V_b$  считалось положительным когда „+“ был подан на верхний электрод). Величина  $\varepsilon$  промежуточного слоя STO в гетероструктуре SRO/STO/SRO рассчитывалась с использованием соотношения  $\varepsilon = Cd/S$ .

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

При  $T = 300 \text{ K}$  параметр псевдокубической элементарной ячейки объемных кристаллов SRO составляет  $3.923 \text{ \AA}$  [9], а параметры кубических ячеек STO и MO равны  $3.905 \text{ \AA}$  [10] и  $4.211 \text{ \AA}$  [11] соответственно. Температурный коэффициент линейного расширения кристаллов MO ( $\beta = (11\text{--}16) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [12]) заметно больше величины  $\beta = (9\text{--}11) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  для SRO и STO.

3.1. Структура выращенных трехслойных систем SRO/STO/SRO. На рис. 1 показаны рентгеновские дифрактограммы, полученные для гетероструктуры SRO/STO/SRO/(001)MO, когда падающий и отраженный рентгеновские пучки находились в плоскости, перпендикулярной (001)MO (*a*) или (101)MO (*b*). На рентгенограммах присутствовали пики только от подложки, промежуточного слоя STO и электродов SRO, причем последние частично перекрывались между собой и с пиками от промежуточного слоя STO (вставка на рис. 1, *a*). Из полученных рентгеновских данных следует, что слои, составляющие трехслойную пленочную систему SRO/STO/SRO, были преимущественно ориентированы как азимутально, так и относительно нормали к плоскости подложки.

Небольшое положительное рассогласование  $m \approx 0.5\%$  в параметрах кристаллических решеток SRO и STO способствует формированию слабых двухосных, сжимающих в плоскости подложки механических напряжений в верхнем слое рутената стронция в гетероструктуре SRO/STO/SRO [ $m = (a_l - a_s)/a_s$ , где  $a_l$  и  $a_s$  — параметры кристаллических решеток слоя и подложки соответственно]. Механические напряжения в нижнем слое рутената стронция той же гетероструктуры, обусловленные существенным рассогласованием в параметрах кристаллических решеток SRO и MO ( $m$  отрицательно и составляет около 7%), в значительной степени релаксировали в процессе его роста. Разница в температурных коэффициентах линейного расширения массивной подложки и слоев, составляющих гетероструктуру SRO/STO/SRO, способствовала латеральному двухосному сжатию последних. Эффективный параметр элементарной ячейки в электродах SRO ( $3.94 \pm 0.01 \text{ \AA}$ ), измеренный вдоль нормали к плоскости подложки, был больше параметра ячейки стехиометрического объемного кристалла рутената стронция. Вследствие перекрытия рефлексов на рентгенограммах точность определения указанного параметра понижена. Параметры элементарной ячейки слоя STO, измеренные в плоскости подложки ( $a_{\parallel} = 3.911 \pm 0.005 \text{ \AA}$ ) и вдоль нормали к ее поверхности ( $a_{\perp} = 3.914 \pm 0.005 \text{ \AA}$ ) отличались незначительно, причем оба были слегка увеличены по сравнению с параметром кристаллической решетки монокристаллов STO. Вероятной причиной увеличения эффективного объема элементарной ячейки слоя STO в гетероструктуре SRO/STO/SRO, по сравнению с соответствующими



**Рис. 2.** Изменение произведения  $\eta \cos \theta$  с увеличением  $\sin \theta$  для слоя STO в гетероструктуре SRO/STO/SRO/(001)MO, кривая 1. На вставке приведена зависимость отношения  $C/C(V_b = 0)$  для сформированного пленочного конденсатора при изменении напряжения смещения в последовательности  $0 \rightarrow +2.5 \rightarrow 0 \rightarrow -2.5 \rightarrow 0$  V.  $T = 4.2$  K,  $f = 100$  kHz.

данными для стехиометрических объемных кристаллов титаната стронция, является его обеднение кислородом.

Полуширина кривой качания ( $\sim 0.6$  градуса) для рентгеновского рефлекса (002)STO от гетероструктуры SRO/STO/SRO/(001)MO (вставка на рис. 1, b) существенно превышала соответствующее значение для слоя STO в гетероструктуре SRO/STO/SRO, выращенной на подложке (001)LSATO [13], хорошо сопрягающейся по параметрам кристаллических решеток с STO и SRO. Это в значительной степени обусловлено высокой плотностью дефектов структуры (вакансии кислорода, дислокации несоответствия) в объеме слоя STO, сформированного на подложке MO, покрытой пленкой рутената стронция.

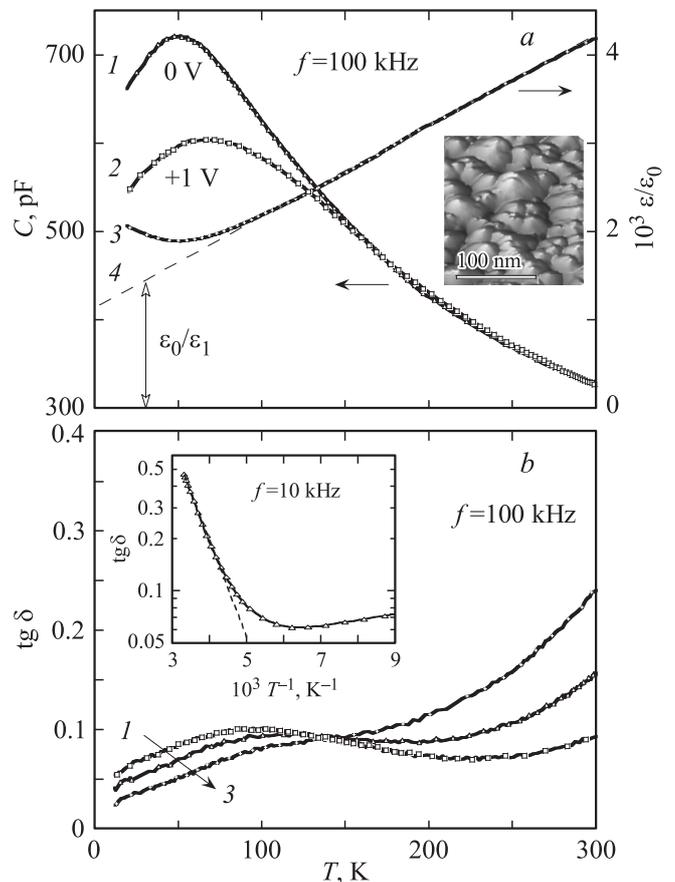
Чтобы получить информацию о среднем латеральном размере кристаллических зерен ( $t$ ) в слое STO была использована зависимость полуширины ( $\eta$ ) пиков (00n)STO на дифрактограмме  $\omega/2\theta$ , полученной для гетероструктуры SRO/STO/SRO, от  $\theta$ . Согласно [14], полуширина пиков на рентгеновской дифрактограмме и  $t$  связаны соотношением

$$\eta = 0.9\lambda_1/(t \cos \theta) + 2 \tan \theta \Delta a/a, \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  — длина волны использованного рентгеновского излучения,  $\Delta a/a$  — эффективная деформация элементарной ячейки. Изменение произведения  $\eta \cos \theta$  с увеличением  $\sin \theta$  показано на рис. 2. С использованием соотношения (1) по отрезку, отсекаемому на оси ординат прямой 1 на рис. 2, мы получили оценку среднего размера ( $t \approx 20$  nm) кристаллических зерен в промежуточном

слое STO в гетероструктуре SRO/STO/SRO/(001)MO. Из данных, представленных на рис. 2, следует, что полуширина пиков (00n)STO на рентгеновских сканах, измеренных для выращенных гетероструктур, определяется в основном эффективным размером кристаллических зерен, а вклад  $\Delta a/a$  незначителен.

Изображение свободной поверхности верхнего электрода из рутената стронция в гетероструктуре SRO/STO/SRO/(001)MO показано на вставке рис. 3, a. Межкристаллитные границы на поверхности слоя SRO декорированы характерными углублениями. Латеральные размеры кристаллитов находились в пределах 20–50 nm. Эффективная азимутальная разориентация кристаллических зерен в слое STO составляла порядка



**Рис. 3.** a) Температурные зависимости емкости  $C$  (1, 2) пленочного конденсатора, сформированного на базе выращенных гетероструктур SRO/STO/SRO/(001)MO, и отношения  $\epsilon_0/\epsilon$  (3) для промежуточного слоя (700 nm)STO. Пунктиром показана касательная (4) к кривой 3 в интервале температуры 100–300 K. Кривые 1 и 3 получены при  $V_b = 0$ , а кривая 2 при  $V_b = +1$  V.  $\epsilon_0/\epsilon_1$  для слоя STO в гетероструктуре отмечено двухсторонней стрелкой. b) Температурные зависимости  $\tan \delta$  (1–3) для конденсаторной гетероструктуры SRO/STO/SRO, полученные при различном напряжении смещения, поданном на электроды SRO. 1 —  $V_b = 0$ , 2 —  $V_b = +1$  V, 3 —  $V_b = +2.5$  V,  $f = 100$  kHz. На вставке приведена зависимость  $\tan \delta$  от обратной температуры для той же гетероструктуры, измеренная при  $f = 10$  kHz и  $V_b = 0$ .

1 градуса (оценка получена с использованием данных по полуширине рентгеновских пиков на  $\phi$ -скане для рефлекса (111)STO от выращенной гетероструктуры).

3.2. Диэлектрические параметры слоя STO в гетероструктуре SRO/STO/SRO. При  $T = 300$  К разброс в величине емкости пленочных плоскопараллельных конденсаторов SRO/STO/SRO, сформированных на одной подложке, не превышал 8%. Температурные зависимости  $C$ , визуализированные при подаче на электроды напряжения смещения и без него, показаны на рис. 3. С понижением температуры емкость сформированных пленочных конденсаторов возрастала вследствие увеличения диэлектрической проницаемости промежуточного слоя STO. При  $V_b = 0$  максимум на кривой  $C(T)$  наблюдался при температуре порядка 50 К. При подаче на электроды напряжения смещения  $V_b = +1$  В максимум на зависимостях  $C$  vs.  $T$  становился более размытым и сдвигался в сторону высоких температур. Емкость конденсаторов уменьшалась примерно на 40%, при  $T = 4.2$  К и  $V_b = \pm 2.5$  В (см. вставку на рис. 2). С увеличением  $T$  в интервале 100–300 К обратная величина диэлектрической проницаемости промежуточного слоя STO линейно возрастала с температурой, причем зависимость  $\varepsilon^{-1}(T)$  хорошо аппроксимировалась соотношением

$$\varepsilon^{-1} = \varepsilon_0^{-1} C_0^{-1} (T - T_{CW}) + \varepsilon_1^{-1}, \quad (2)$$

где  $C_0 \approx 10^5$  К и  $T_{CW} = 30$  К практически совпадали с постоянной Кюри и температурой Кюри–Вейсса для монокристаллов титаната стронция [15], а параметр  $\varepsilon_1$  равнялся примерно  $700 \varepsilon_0$ . Первое слагаемое в правой части соотношения (2) отражает вклад в измеренную емкость  $C$  конденсаторной структуры со стороны промежуточного слоя  $C_F$ , а второе связано с емкостью межфазных границ  $C_I$ , причем  $C_F$  и  $C_I$  соединены последовательно  $C = C_F C_I / (C_F + C_I)$ . Появление второго слагаемого в правой части соотношения (2) обусловлено проникновением электрического поля в оксидные электроды [16]. Отношение  $\varepsilon_0/\varepsilon_1$  показано на рис. 3, *a* двухсторонней стрелкой. Следует отметить, что в указанном выше интервале температур  $C_I$  не зависело от  $V_b$ . Используя полученное значение  $\varepsilon_1$  нами была оценена емкость  $C_I = 2\varepsilon_1/d \approx 2\mu\text{F}/\text{cm}^2$ , сосредоточенная на единице поверхности межфазной границы SRO/STO в гетероструктурах SRO/STO/SRO/(001)MO. Полученная в настоящей работе оценка  $C_I$  для границы SRO/STO в гетероструктурах, сформированных на подложке MO, хорошо согласуется с соответствующими данными для межфазных границ  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$  [17] и  $\text{Ag}/\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75}\text{TiO}_3$  [18]. Следует, однако, отметить, что емкость межфазных границ SRO/STO в гетероструктурах, выращенных на подложках с малым рассогласованием в параметрах кристаллических решеток и в температурных коэффициентах линейного расширения, существенно превосходит [13] величину  $C_I$  в конденсаторных структурах, сформированных на подложке из оксида магния.

Основной причиной существенной деградации емкости межфазных границ в гетероструктуре SRO/STO/SRO, сформированной на подложке (001)MO, по сравнению с величиной  $C_I$  для соответствующих гетероструктур, выращенных на (001)LSATO, является высокая плотность дефектов структуры (дислокации несоответствия, дефекты упаковки и т.д.) и нарушение стехиометрии по кислороду в наноразмерных прослойках электродов SRO, прилегающих к границам STO/SRO. Механизмы, ответственные за нарушение стехиометрии гетероэпитаксиальных наноразмерных перовскито-подобных оксидных пленок детализированы в [19]. Нарушение стехиометрии и дефекты структуры индуцируют понижение концентрации электронов в SRO, что непосредственно сказывается на глубине проникновения электрического поля в электрод.

На рис. 3, *b* приведены температурные зависимости  $\tan \delta$  для выращенных емкостных структур SRO/STO/SRO, измеренные при  $f = 100$  kHz и различном напряжении смещения, поданном на электроды. При  $V_b = 0$  величина  $\tan \delta$  находилась в пределах 0.07–0.10 и слабо зависела от температуры. Вероятной причиной появления размытого максимума на зависимости  $\tan \delta(T, V_b = 0)$  (кривая 1 на рис. 3, *b*) при температурах чуть ниже 100 К является взаимодействие электромагнитной волны с доменными стенками [20], появляющимися в объеме слоя STO вследствие структурного фазового перехода (при  $T \approx 110$  К элементарная ячейка титаната стронция из кубической превращается в тетрагональную). С уменьшением частоты измерительного сигнала максимум на зависимости  $\tan \delta(T)$  сдвигался в сторону низких температур.

При  $T > 150$  К увеличение напряжения смещения, поданного на электроды, сопровождалось резким ростом тангенса угла диэлектрических потерь. Данный факт обусловлен увеличением электропроводности ( $\sigma$ ) промежуточного слоя STO вследствие эмиссии Пула–Френкеля [21]. Согласно [22],  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  и  $\tan \delta$  связаны соотношением  $\tan \delta = (\varepsilon'' + \sigma/\omega)/\varepsilon$ , где  $\varepsilon''$  — мнимая часть диэлектрической проводимости, а  $\omega = 2\pi f$ . Электрическое поле  $E = V_b/d$  уменьшает энергетический зазор ( $\varphi$ ) между краем зоны проводимости STO и донорным уровнем для носителей заряда, индуцированных кислородными вакансиями, что способствует увеличению концентрации электронов и как следствие приводит к увеличению  $\sigma$ . Зависимость электропроводности кристаллов и эпитаксиальных пленок STO с высокой концентрацией кислородных вакансий от температуры и электрического поля может быть представлена в виде [21]

$$\sigma \approx A_0 e \mu \exp[-(\varphi - \beta E^{1/2})/rkT], \quad (3)$$

где  $A_0$  — не зависящий от температуры параметр,  $e$  — заряд электрона,  $\mu$  — подвижность носителей заряда в образце,  $k$  — постоянная Больцмана,  $r$  — константа, величина которой находится между единицей

и двойкой,  $\beta = (e^3/\pi\epsilon_0\epsilon^{hf})^{1/2}$ ,  $\epsilon^{hf}$  — диэлектрическая проницаемость при высокой частоте. С уменьшением  $\omega$  и увеличением  $T$  относительный вклад электропроводности в  $\tan \delta$  слоя STO увеличивается. Когда отношение  $\sigma/\omega$  становится много больше  $\epsilon''$ , зависимость тангенса угла диэлектрического слоя STO от  $T$  в значительной степени определяется температурной зависимостью его электропроводности. На вставке рис. 3, *b* приведена зависимость  $\tan \delta(T^{-1}, V_b = 0)$ , полученная при частоте измерительного сигнала 10 kHz. При температурах, близких к комнатной,  $\tan \delta$  экспоненциально зависел от  $T$ . По наклону касательной (показана пунктиром на рисунке) к зависимости  $\tan \delta(T^{-1}, V_b = 0)$  при температурах, близких к 300 К, получена оценка энергетического зазора ( $\varphi \approx 0.1$  eV) между зоной проводимости и донорным уровнем, связанным с наличием в объеме слоя STO кислородных вакансий. Полученная оценка хорошо согласуется с соответствующими данными [23], имеющимися в литературе.

## Заключение

Электроды из рутената стронция и промежуточный слой титаната стронция, интегрированные в пленочной плоско-параллельной конденсаторной гетероструктуре, сформированной на (001)MgO, четко ориентированы как азимутально, так и относительно нормали к плоскости подложки. Использование подложки со значительным рассогласованием в параметрах кристаллических решеток и коэффициентов линейного расширения способствует возникновению двухосных сжимающих механических напряжений в слоях, интегрированных в гетероструктуре. Релаксация напряжений в гетероструктуре SRO/STO/SRO/(001)MO индуцирует увеличение концентрации вакансий кислорода и дефектов структуры как в электродах SRO, так и в промежуточном слое STO.

Это обуславливает уменьшение удельной емкости межфазных границ SRO/STO и увеличение электропроводности промежуточного слоя STO.

## Список литературы

- [1] R. Dittmann, R. Plonka, E. Vasco, N.A. Pertsev, J.Q. He, C.L. Jia, S. Hoffmann-Eifert, R. Waser. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 5011 (2003).
- [2] A. Sharma, Z.-G. Ban, S.P. Alpay, J.V. Mantese. *Appl. Phys. Lett.* **85**, 985 (2004).
- [3] Yu.A. Boikov, E. Olsson, T. Claeson. *Phys. Rev. B* **74**, 024 114-1 (2006).
- [4] Yu.A. Boikov, Z.G. Ivanov, A.N. Kiselev, E. Olsson, T. Claeson. *J. Appl. Phys.* **78**, 4591 (1995).
- [5] P.A. Cox, R.G. Egdell, J.B. Goodenough, A. Hamnett, C.C. Naish. *J. Phys. C*: **16**, 6221 (1983).
- [6] X. Fang, T. Kobayashi. *J. Appl. Phys.* **90**, 162 (2001).
- [7] A.G. Schrott, J.A. Misewich, V. Nagarajan, R. Ramesh. *Appl. Phys. Lett.* **82**, 4770 (2003).
- [8] M. Julia. Phillips. *J. Appl. Phys.* **79**, 1829 (1996).
- [9] J.C. Jiang, W. Tian, X. Pan, Q. Gan, C.B. Eom. *Mater. Sci. Eng. B* **56** 152 (1998).
- [10] R.B. Wyckoff. *J. Crystal Structures*. 2nd ed. Interscience, NY (1964). V. 2. P. 394.
- [11] V. Srikant, E.J. Tarsa, D.R. Clarke, J.S. Speck. *J. Appl. Phys.* **77**, 1517 (1995).
- [12] Luke S.-J. Peng, X.X. Xi, Brian H. Moeckly. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 4592 (2003).
- [13] Yu.A. Boikov, T. Claeson. *Physica C* **336**, 3–4, 300 (2000).
- [14] E.D. Specht, R.E. Clausing, L. Heatherly. *J. Mater. Res.* **5**, 2351 (1990).
- [15] A.D. Hilton, B.W. Ricketts. *J. Phys. D* **29**, 1321 (1996).
- [16] G. Simmons. *Appl. Phys. Lett.* **6**, 54 (1965).
- [17] Ю.А. Бойков, В.А. Данилов. *ПЖТФ* **30**, 26 (2004).
- [18] Yu.A. Boikov, T. Claeson. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 4603 (2002).
- [19] Yu.A. Boikov, R. Gunnarsson, T. Claeson, *J. Appl. Phys.* **96**, 435 (2004).
- [20] R. Viana, P. Lunkenheimer, J. Hemberger, R. Böhmer, A. Loide. *Phys. Rev. B* **50**, 601 (1994).
- [21] J.R. Yeagan, H.L. Taylor. *J. Appl. Phys.* **39**, 5600 (1968).
- [22] P. Dorenbos, H.W. den Hartog, R. Kruizinga, S. Vrind. *Phys. Rev. B* **35**, 5774 (1987).
- [23] O.N. Tufte, P.W. Chapman. *Phys. Rev.* **155**, 796 (1967).