

УДК 539.3

НАНОРАЗМЕРНЫЕ ПЬЕЗОАКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2011 г.

В.В. Калинин

Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону

kalin@ssc-ras.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Приведен обзор результатов экспериментальных и теоретических исследований эпитаксиальных наноразмерных сегнетоэлектрических пленок сложных оксидов. За счет особенностей сопряжения решетки пленки с решеткой подложки в рамках технологического процесса они приобретают уникальные свойства, отличные от свойств обычных сегнетоэлектриков. Особую роль играет зависимость механических и электрических свойств эпитаксиальных сегнетоэлектрических пленок от их толщины. Обсуждаются возможности и перспективы использования эпитаксиальных наноразмерных сегнетоэлектрических пленок сложных оксидов для изготовления сенсоров деформации, микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС, НЭМС) и акустоэлектронных устройств.

Ключевые слова: пьезоэлектрик, сегнетоэлектрик, наноразмерная структура, пленка, подложка, феноменологический потенциал, функция Гиббса.

Введение

Как показывают многочисленные эксперименты, свойства тонких эпитаксиальных сегнетоэлектрических пленок на различных подложках существенно отличаются от соответствующих свойств объемного материала. Во многих случаях эти гетероструктуры приобретают новые, отличные от объемных материалов свойства, наличие которых определяется особенностями технологических процессов осаждения тонких сегнетоэлектрических пленок. Такое различие определяется наличием значительных внутренних механических напряжений, возникающих из-за значительной разницы коэффициентов теплового расширения пленки и подложки. Изучение внутренних механических напряжений является важной проблемой для понимания причин их возникновения и влияния их на диэлектрические и пьезоэлектрические свойства тонких сегнетоэлектрических пленок.

Механические и физические свойства гетероструктуры

Эффекты влияния деформаций на электрические и электромеханические свойства пленок интенсивно изучаются как теоретически, так и экспериментально. Теоретически детально изучаются свойства термодинамической функции Гиббса. В экспериментах для исследования пленки

используется уникальное оборудование. Наиболее чувствительными к внутренним напряжениям параметрами являются структурные характеристики. На рис. 1 приведены кривые, иллюстрирующие влияние толщины пленки на параметры решетки пленки.

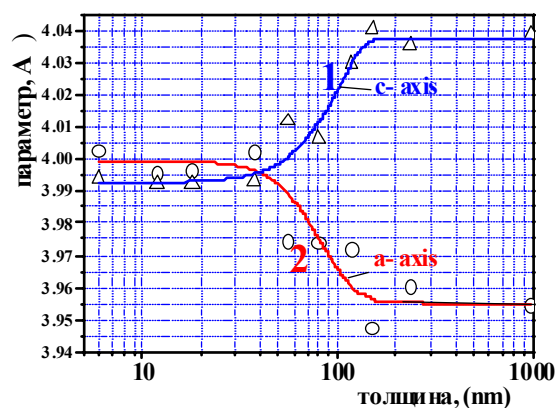


Рис. 1

Как следует из графиков, в области от 6 нм до 50 нм параметры решетки практически не изменяются. Параметр a решетки (в плоскости подложки) превышает значения параметра c (вдоль нормали к плоскости подложки), т.е. в пленках возникают растягивающие напряжения в плоскости подложки. В области значений с толщиной 30 до 100 нм происходит резкое изменение пара-

метров решетки, причем параметр c увеличивается и становится больше параметра a . При толщине пленок более 100 нм параметры решетки вновь становятся слабо зависящими от толщины. При этом параметр c в этой области превышает величину a . Таким образом, в интервале значений толщины от 100 до 1000 нм на пленку действуют напряжения сжатия, которые при превышении некоторой толщины (порядка 70 нм) становятся и остаются постоянными. Представленные на рис. 1 зависимости относятся к разным образцам. На графике каждая точка соответствует образцу, в котором уже завершилась релаксация напряжений, проходящая несколько стадий.

На рис. 2 приведены кривые, иллюстрирующие влияние толщины пленки на параметр решетки a (кривая 1), диэлектрическую проницаемость ϵ (кривая 2) и частоту колебаний решетки (кривая 3).

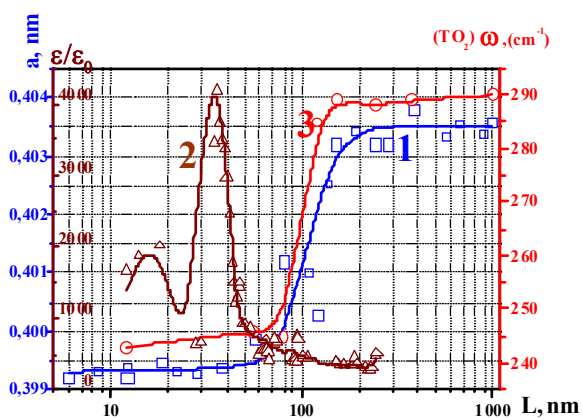


Рис. 2

Как следует из графиков, существует значение толщины пленки (≈ 50 нм), на которой ее диэлектрические свойства приобретают аномально высокие значения. Аналогично существует значение толщины пленки, на которой аномально высокие значения приобретают ее пьезоэлектрические свойства.

Таким образом, за счет начальной деформации кристалла при нанесении на подложку возникла пьезоактивная гетероструктура, обладающая сверхвысоким значением диэлектрической проницаемости, а также неординарным значением пьезомодуля $d_{33} = 7 \cdot 10^{-9}$ Кл/Н.

Некоторые направления использования наноразмерных сегнетоэлектрических гетероструктур

Неординарные электрические свойства пьезоактивной гетероструктуры позволили создать датчик динамической деформации генераторно-

го типа, обладающий уникальными свойствами. Особенностью датчика является то, что с точки зрения прочностных (механических) свойств он имеет свойства подложки (металла), а с точки зрения преобразования динамической деформации имеет свойства сегнетоэлектрической пьезокерамики, для которой характерны высокая диэлектрическая проницаемость и большие значения пьезомодуля. Основу датчика составляет сегнетоэлектрическая пленка $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (PZT), нанесенная методом высокочастотного распыления на подложку из металлической фольги (1X18Н9Т) толщиной 40 мкм. Это позволило получить датчик с чувствительностью, приведенной к 10 мкВ относительной деформации 10^{-9} , динамическим диапазоном 150 дБ, емкостью 800 пФ, диапазоном рабочих частот от 10^{-3} до 10^9 Гц и диапазоном рабочих температур от -190 до $+200$ °С при размерах $0.5 \times 0.5 \times 0.01$ мм³ и массе не более 10^{-3} г. Использование таких датчиков открывает перспективы создания систем непрерывного мониторинга – дистанционного контроля за состоянием ответственных деталей и узлов, выполненных из композиционных материалов различной структуры, что может явиться решающим фактором как на стадии производства для контролирования качества изготовления, так и в процессе эксплуатации для повышения надежности эксплуатации и предотвращения аварийных ситуаций.

Другим важным направлением использования уникальных свойств наноразмерных сегнетоэлектрических структур является создание МЭМС и НЭМС на основе гетероструктур на кремнии. Современные технологии обработки кремния позволяют создавать миниатюрные устройства, обладающие специально ориентированными механическими свойствами, которые могут служить сенсорами различных механических и физических параметров, а также исполнительными устройствами широкого назначения.

Большим технологическим прорывом может оказаться использование наноразмерных сегнетоэлектрических структур при создании принципиально новых типов миниатюрных акустоэлектронных устройств, обладающих сверхвысокочастотными свойствами (десятки и сотни ГГц). Ценным обстоятельством является высокая чувствительность наноразмерной пленки к воздействию статическим электрическим полем. При этом приложение электрического потенциала в несколько вольт может создавать напряженность электрического поля до 10^6 В/м. Предварительные эксперименты подтвердили возможность перестройки рабочих частот за счет воздействия статическим электрическим полем.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты №09-01-00695, 09-08-01065, 09-08-96527-юэ), а также программы №11П РАН.

Список литературы

1. Shirokov V.B., Yuzyuk Yu.I., Dkhil B., Lemanov V.V. // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 79. P. 144118.

2. Широков В.Б. и др. // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2010. №4. С. 44–53.

3. Благин А.В., Калинин В.В., Лебедев В.И., Лушин Л.С. Физика кристаллизации и дефектов твердотельных структур на микро- и наномасштабах. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. 288 с.

4. Есипов Ю.В. и др. // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2010. №4. С. 18–28.

PIEZOACTIVE NANOSTRUCTURE: POTENTIALITIES AND PROSPECTS

V.V. Kalinchuk

A review of experimental and theoretical studies of ferroelectric epitaxial nanoscale pellicles of complex oxides is given. Due to the peculiarities of pellicle lattice coupling with the substrate lattice in the framework of technological process they acquire properties that are unique and different from the usual ferroelectric properties. The dependence of the mechanical and the electric properties of epitaxial ferroelectric pellicles on their thickness plays a special role. Due to a special selection of the thickness of pellicles to achieve the specified device parameters, pellicles with unique properties are obtained. The possibilities and prospects of using nanoscale epitaxial ferroelectric pellicles of complex oxides in the production of strain sensors, micro- and nano-electro-mechanical systems (MEMS, NEMS) and acoustic-electronic devices are discussed.

Keywords: piezoelectric, ferroelectric, nanostructures, pellicle, substrate, phenomenological potential, Gibbs function.