

Собственно домен описывается решением (3) при  $z=0$ . При этом надо помнить, что (3) записано в системе, движущейся со скоростью  $u$ , при переходе к переменным  $z, t$  к (3) добавляется слагаемое  $uP_z$ . Решение имеет вид  $P = P_1 \text{ch}^{-2}((z-vt)/\Delta)$ . Связь между  $P_1, v$  и  $\Delta$  дается выражениями  $v-u = -(2u^3/\omega^2 p)(c/u-u/c)^2 \Delta^{-2}$ ,  $P_1 = -(2u^2/\alpha P_0)\Delta^{-2}$ . Для  $v=0$  получаем  $\Delta = \sqrt{2}(u/\omega_p) | (c/u-u/c) | \approx \sqrt{2}(c/\omega_p)$ . Для  $\omega_p \sim 10^{13}$  1/с  $\Delta \sim 10^{-3}$  см. Уравнение (3) при  $z=0$  является полностью интегрируемым [5]. Решения в виде доменов (солитонов) связаны с дискретным спектром соответствующей спектральной задачи. Их вклад в гамильтониан отрицателен, это приводит к выигрышу в энергии при разбегании однородно поляризованного образца на домены.

Приведенные выше решения не исчерпывают всех возможных решений (1). Потеря решений происходит, когда в первом порядке по  $\epsilon$  мы полагаем  $E^1 = (4\pi u^2)/(c^2 - u^2) P^{(1)}$ , опуская слагаемые  $\sim \delta(c \pm u)$ , которые соответствуют решениям уравнения  $c^2 E_{xx} - E_{tt} = 0$ . Получить уравнение, обобщающее (3) с учетом сказанного, в рамках многомасштабной теории затруднительно. Обратимся к эвристическому методу. Точное уравнение для фурье-компоненты  $P(k, \omega)$  следует из линеаризованной системы (1)

$$\left[ \omega^2 - \omega_0^2 - 3\alpha P_0^2 - \frac{\omega_p^2 \omega^2}{\omega^2 - c^2 k^2} \right] P(k, \omega) = -\frac{\omega_p^2}{4\pi} E_{\text{вн}}(k, \omega), \quad (4)$$

где  $E_{\text{вн}}(k, \omega)$  — фурье-компонента внешнего поля, т. е. решения уравнения  $c^2 E_{xx} - E_{tt} = 0$ . С точностью до членов  $\sim k^3$  (4) можно записать в виде

$$\omega [\omega - uk - \mu k^3] P(k, \omega) = -\frac{\omega_p^2}{4\pi} E_{\text{вн}}(k, \omega),$$

где  $u$  определяется дисперсионным уравнением первого приближения, а  $\mu = -(u^3/2\omega_p^2) \times \times (c/u - u/c)^2$ . Переходя к  $P(z, t)$  и восстанавливая нелинейность, получаем уравнение

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{3\alpha u P_0}{\omega_p^2} \left( \frac{c}{u} - \frac{u}{c} \right)^2 P \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{u^3}{2\omega_p^2} \left( \frac{c}{u} - \frac{u}{c} \right)^2 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right] = \frac{\omega_p^2}{4\pi} E_{\text{вн}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) может быть использовано для исследования волны поляризации в нелинейном диэлектрике, помещенном во внешнее поле. Для периодически зависящего от времени  $E_{\text{вн}}$ , воспользовавшись результатами работы [6], можно получить информацию о расположении областей стохастичности в фазовом пространстве невозмущенного уравнения КдВ.

### Список литературы

- [1] Островский Л. А. // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. Вып. 10. С. 1189.
- [2] Абловиц М., Сигур Х. Солитоны и метод обратной задачи. М.: Мир, 1987. 480 с.
- [3] Лэм Дж. Л. Введение в теорию солитонов / Под ред. В. Е. Захарова. М.: Мир, 1983. 294 с.
- [4] Шнейдер Э. Я., Шпитальник Б. Ц., Проскураков Б. Ф. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1975. Т. 39. № 4. С. 861—863.
- [5] Захаров В. Е., Манаков С. В., Новиков С. П., Питаевский Л. П. Теория солитонов: метод обратной задачи. М.: Наука, 1980. 320 с.
- [6] Пиковский А. С. Автореф. канд. дис. Горький, 1982.

Поступило в Редакцию  
1 апреля 1988 г.

## КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ СТРУКТУРНЫМ СОВЕРШЕНСТВОМ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК И СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОТЕРЯМИ В НИХ

И. В. Барский, О. Г. Вендик, А. Д. Смирнов, Г. С. Хижа

Использование сегнетоэлектриков в управляющих устройствах СВЧ диапазона до сих пор встречает значительные трудности. Основное — это недостаточность информации о частотной зависимости диэлектрических потерь ( $\text{tg } \delta$ ) в пленках и почти полное отсутствие данных о связи потерь и структурных характеристик пленок [1].

Последовательные усилия, направленные на изучение процесса роста гетероэпитаксиальных сегнетоэлектрических пленок (ГСЭП), их состава и структуры, позволили обеспечить устойчивый процесс получения образцов пленочных структур для развернутого исследования их свойств [2-4]. Однако, кроме корреляции между величиной  $\text{tg } \delta$  на СВЧ и отношением токов вторичных ионов стронция и бария в методе ВИМС [3], достоверной информации о связи между СВЧ потерями и структурными параметрами пленок получить не удавалось.

В настоящей работе в качестве характеристики структурного совершенства пленки используется величина микродеформации второго рода  $\Delta a/a$ , полученная методом рентгенодифрактометрии [5]. СВЧ потери измерялись на частотах 15, 40 и 64 ГГц.

### Получение образцов

Монокристаллический периклаз ( $\text{MgO}$ ) является практически единственным материалом, удовлетворяющим основным требованиям выращивания на нем гетероэпитаксиальных пленок сложных окислов со структурой перовскита. Кроме того,  $\text{MgO}$  имеет высокую теплопроводность и низкие диэлектрические потери, поэтому структуры  $\text{MgO}$ —пленка пригодны для исследований диэлектрических свойств пленок в СВЧ диапазоне.

В качестве активного сегнетоэлектрического материала использовался твердый раствор  $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ . Этот материал достаточно широко используется в качестве нелинейного диэлектрика, предназначенного для работы при комнатной температуре в СВЧ диапазоне [3]. Свойства керамики и монокристаллических пленок названного состава достаточно полно изучены на более низких частотах [1, 6, 7].

Изготовление пленок проводилось методом ВЧ реактивного осаждения в условиях сильного контрагирования разряда в зоне распыления мишени при повышенном давлении кислорода и высокой удельной мощности ВЧ разряда [4]. Температура подложки, величина удельной мощности ВЧ разряда, давление рабочего газа (кислорода), расстояние мишень—подложка выбирались из условий реализации монослойного роста конденсата [4]. Толщина пленок контролировалась по привесу с учетом плотности твердого раствора  $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ , равной 5.6 г/см<sup>3</sup>. В экспериментах использовались пленки толщиной около 1 мкм.

### Измерение параметров пленок и обсуждение результатов

Структурный анализ ГСЭП проводился на дифрактометре Дрон-3.0. Степень совершенства конденсатов оценивалась величиной микродеформаций второго рода ( $\Delta a/a$ ), которую интерпретировали как интегральную меру структурных дефектов, ответственных за изменение межплоскостных расстояний в кристаллической решетке пленки [3].

Диэлектрические потери ( $\text{tg } \delta$ ) пленок в сантиметровом диапазоне длин волн измерялись методом объемного резонатора, а в миллиметровом диапазоне квазиоптическим методом [7, 8]. При квазиоптических измерениях образец располагался между двумя рупорными антеннами. Измерялся модуль коэффициента передачи, который зависел от дифракции волн на образце. Измерялась зависимость модуля коэффициента передачи от частоты как для подложки без пленки, так и для подложки с исследуемой пленкой. Полученные зависимости обрабатывались на ЭВМ. Итогом расчетов являлось произведение  $\epsilon_{\text{пл}} h$ , где  $\epsilon_{\text{пл}}$ — диэлектрическая проницаемость пленки,  $h$  — ее толщина. Погрешность измерения для  $\epsilon_{\text{пл}}$  составляет 5. . 8 %, для  $\text{tg } \delta$  — 15. . 20%. Сравнение результатов, полученных квазиоптическим методом и методом короткозамкнутой частично заполненной линии [7], указывает на приблизительно равноценность методов по точности, но с меньшей трудоемкостью для квазиоптического метода.

Последовательность измерений состояла в следующем: измерялись потери в пленке, снималась дифрактограмма, рассчитывались  $\Delta a/a$ , на пленку наносились электроды и измерялась управляемость (коэффициент перекрытия по емкости при подаче на электроды напряжения).

Для обработки результатов отбирались пленки, имеющие коэффициент управляемости  $K=1.5. . 2.5$ . Измерения  $K$  проводились на структуре в виде планарного конденсатора при ширине зазора  $\sim 3$  мкм. Зазор выдерживал постоянное напряжение до 200 В.

Результаты измерений  $\Delta a/a$  и  $\text{tg } \delta$  различных пленок позволили установить между этими величинами корреляционную связь, приведенную на рис. 1. Из рисунка следует, что более структурно упорядоченному конденсату соответствуют меньшие потери. Заметим также, что пленки с меньшим  $\Delta a/a$ , как правило, показывают и меньший коэффициент управляемости  $K$ . Приведенные на рис. 1 погрешности соответствуют погрешностям измерения и статистическому разбросу данных от образца к образцу. Всего было исследовано несколько сотен образцов. В нашем распоряжении имеются данные по широкому спектру значений  $\Delta a/a$  и соот-

ветствующих им значений  $\text{tg } \delta$ . Они все удовлетворительно ложатся на пунктирные линии, проведенные на рис. 1.

Таким образом, в результате проведенных исследований структурных и диэлектрических характеристик пленок  $(\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4})\text{TiO}_3$  на монокристаллических подложках  $\text{MgO}$  установлена статистически достоверная корреляция между значением  $\text{tg } \delta$  на СВЧ п микродеформацией второго рода. Установленная связь между  $\Delta a/a$  и  $\text{tg } \delta$  позволяет использовать ее на пути совершенствования диэлектрических свойств пленок и прогнозировать дальнейшее уменьшение значения  $\text{tg } \delta$  в 1.5. . . 2 раза при сохранении управляемости пленки в установленных выше пределах.

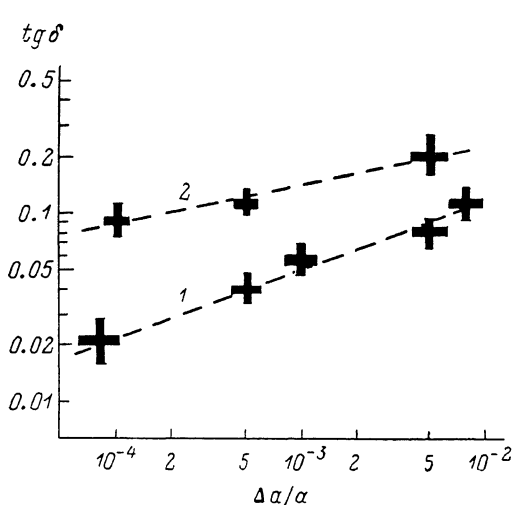


Рис. 1. Корреляционная связь между  $\text{tg } \delta$  и микродеформацией второго рода в пленках  $(\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4})\text{TiO}_3$  на частотах 15 (1), 64 ГГц (2).

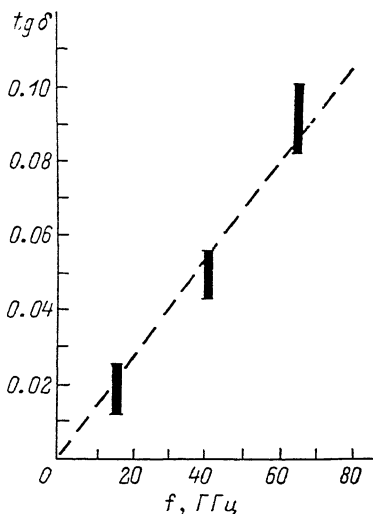


Рис. 2. Зависимость  $\text{tg } \delta$  от частоты пленок  $(\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4})\text{TiO}_3$  при 300 К.

На рис. 2 приведена зависимость  $\text{tg } \delta$  от частоты для наиболее совершенных в структурном отношении пленок, полученных в настоящей работе. Измерения проводились при комнатной температуре. Зависимость  $\epsilon(T)$  соответствует сильно размытому фазовому переходу, что свидетельствует о наличии механических напряжений в пленке. Зависимость  $\text{tg } \delta$  от частоты (рис. 2) отвечает теоретическим представлениям, связанным с рассеянием СВЧ поляризации сегнетоэлектрика на заряженных дефектах и тепловых колебаниях кристаллической решетки [6]. Сопоставление полученной зависимости  $\text{tg } \delta$  от частоты с теоретическими оценками  $\text{tg } \delta$  сегнетоэлектрической пленки с бездефектной структурой говорит о том, что полученные значения  $\text{tg } \delta$  примерно в 1. . . 2.5 раза больше теоретических оценок [1].

### Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Показана принципиальная возможность получения структурно совершенных оксидных сегнетоэлектриков ВЧ реактивным методом. Получены однородные ГСЭП  $(\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4})\text{TiO}_3$  с величиной микродеформации второго рода  $10^{-4}$ .

2. Показано, что в интервале частот 15—64 ГГц  $\text{tg } \delta$  ГСЭП  $(\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4})\text{TiO}_3$  пропорционален частоте и на частоте 60 ГГц не превышает 0.1. При управляемости 1.5. . . 2.5 это позволяет использовать полученные пленки в управляющих устройствах.

3. Установлена корреляционная связь между структурной упорядоченностью конденсаторов и диэлектрическими потерями в них, что позволяет использовать величину  $\Delta a/a$  как информативный и контролируемый параметр, определяющий степень пригодности данной пленки для конкретного применения.

Авторы весьма признательны В. М. Беляеву за участие в измерениях диэлектрических параметров пленок, Е. А. Головицкой за подготовку подложек и получение ГСЭП, Н. В. Столярюву за структурные исследования пленок.

- [1] Вендик О. Г., Мироненко И. Г., Тер-Мартirosян Л. Т. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1987. Т. 51. № 10. С. 1748—1752.  
 [2] Ильинский Л. С., Попов В. Ф., Смирнов А. Д., Беляев В. М. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 1. С. 163—164.  
 [3] Давыдова Т. Ю., Смирнов А. Д., Столяров Н. В., Хижа Г. С. // Электронная техника. Электроника СВЧ. Сер. 1. 1982. Вып. 11. С. 57—61.  
 [4] Вендик О. Г., Ильинский Л. С., Смирнов А. Д., Хижа Г. С. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 4. С. 772—777.  
 [5] Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н., Росторгуев Л. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. 632 с.  
 [6] Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Под ред. О. Г. Вендика. М.: Сов. радио, 1979. 272 с.  
 [7] Брокс А. Я., Такере З. А., Биркс Э. К. и др. // Изв. вузов. Физика. 1981. № 8. С. 81—93.  
 [8] Ирисова Н. А., Козлов Г. В., Нарытник Т. Н. и др. // Кристаллография, 1974. Т. 19. № 2. С. 403—404.

Ленинградский  
электротехнический институт  
им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поступило в Редакцию  
19 апреля 1988 г.  
В окончательной редакции  
17 ноября 1988 г.

## ЖИДКОФАЗНАЯ ЭПИТАКСИЯ ИЗОПЕРИОДИЧЕСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР В СИСТЕМЕ Pb—Sn—Te—Se

Г. И. Жовнир, О. Н. Царенко

### Введение

Твердые растворы замещения на основе соединений  $A_4B_6$  в последние годы находят широкое применение в ИК оптоэлектронике, в частности для создания инжекционных гетеролазеров, работающих в области спектра 3—30 мкм. Использование в гетеролазерах четверных твердых растворов  $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y$ , согласованных по периоду кристаллической решетки с подложкой, позволяет повысить эффективный квантовый выход излучения и снизить пороговый уровень возбуждения при низких температурах, обеспечивает непрерывный режим работы при 77 К и повышение рабочей температуры до 170 К [1-3]. В [1-4] исследованы параметры изопериодических структур  $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y$ , выращенных методом жидкофазной эпитаксии при температурах 870—940 К на подложках PbSe, PbTe и  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ .

В данной работе приведены результаты исследований гетероструктур (ГС)  $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y$ , согласованных по периоду решетки с KCl. Достоинством таких подложек является возможность осуществления электрической развязки при создании многоэлементных приборов.

1. Ширину запрещенной зоны  $E_g$  и параметр решетки  $a$  четверного твердого раствора  $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se$  рассчитывали по формулам [4, 5]

$$E_g = 0.18 + 4.4 \cdot 10^{-4} \cdot T - 0.05x - 0.52y - 0.37xy, \quad (1)$$

$$a = 6.461 - 0.3345y - (0.134 - 0.0175y)x, \quad (2)$$

полученным в приближении линейной зависимости  $E_g$  и  $a$  от состава тройных твердых растворов. С учетом (1), (2) соотношение между концентрациями  $x$  и  $y$  вдоль изопериодной линии  $a_{PbSnTeSe} = a_{KCl} = 6.29 \text{ \AA}$  описывается выражением

$$y = \frac{0.171 - 0.134x}{0.3345 - 0.0175x}, \quad (3)$$

а зависимость  $E_g(x)$  приобретает вид

$$E_g = \frac{0.05x^2 - 0.0135x - 0.0289 + 1.47 \cdot 10^{-4} \cdot T}{0.3345 - 0.0175}. \quad (4)$$