

## ПОЛЕ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ И УСТАЛОСТЬ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОНКИХ ПЛЕНОК

© В.В.Леманов, В.К.Ярмаркин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Поступила в Редакцию 4 марта 1996 г.)

Исследована зависимость величины переключаемого заряда сегнетоэлектрических тонких пленок цирконата-титаната свинца от числа циклов переключения поляризации знакопеременными импульсами напряжения фиксированной амплитуды и длительности при варьировании частоты их следования. Показано, что определяющее влияние на усталость пленок в исследованном диапазоне частот переключения поляризации (100 Hz–100 kHz) оказывает поле деполяризации, обусловленное наличием в приэлектродных областях пленок прослоек несегнетоэлектрической фазы со структурой пиррохлора.

Известно, что при многократных переключениях поляризации в сегнетоэлектриках под действием внешнего электрического поля наблюдается так называемое явление усталости, проявляющееся в значительном уменьшении величины переключаемого заряда. Происходит как бы блокирование переключения поляризации. Это явление наиболее ярко проявляется в сегнетоэлектрических тонких пленках. Физика указанного процесса еще недостаточно выяснена. Предполагается, что усталость сегнетоэлектрических тонких пленок связана с электромиграцией заряженных дефектов [1,2] и/или с пиннингом доменных стенок [3,4]. Электромиграция дефектов (например, кислородных вакансий) приводит к формированию в объеме пленок проводящих дендритообразных скоплений (нитей), либо к образованию в приэлектродных областях пленок областей пространственного заряда. Пиннинг доменных стенок приводит к уменьшению их подвижности и образованию устойчивых (по отношению к внешнему полю) доменных структур [5]. При этом обычно считается, что эффекты усталости возникают и накапливаются в сегнетоэлектриках непосредственно во время воздействия на них импульсов знакопеременного напряжения. Однако имеются экспериментальные данные [6], которые противоречат такой точке зрения. Действительно, согласно результатам работы [6], количество циклов переключения поляризации  $N_c$ , вызывающих одинаковое (в 2 раза) уменьшение переключаемого заряда, зависит от частоты следования  $f$  знакопеременных импульсов напряжения при их постоянной длительности и амплитуде, так что в широком интервале значений  $f$  (от 1 до  $10^7$  Hz) выполняется соотношение  $\lg N_c \sim \lg f$ . Это означает,

что усталость пленок определяется не столько временем действия действия самих импульсов, сколько продолжительностью временных интервалов между ними, превышающих длительность импульсов (при соответствующих значениях  $f$ ) в сотни и тысячи раз. В связи с этим в работе [7] было высказано предположение, что определяющее влияние на усталость пленок оказывает не внешнее поле  $E_{\text{вн}}$ , а поле деполяризации  $E_d$ , возникающее в пленках после окончания импульсов приложенного к ним напряжения.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования усталости сегнетоэлектрических тонких пленок цирконата-титаната свинца (ЦТС), подтверждающие справедливость указанного предположения. Этот вывод, хотя он и не дает прямого ответа на вопрос о том, как возникает усталость, может оказаться полезным для выяснения механизмов усталости.

## 1. Приготовление образцов и методика измерений

Исследовались тонкие пленки ЦТС состава  $\text{PbZr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3$  толщиной 200 нм, полученные золь-гель-методом на окисленных (500 нм) (111)-пластинах кремния, металлизированных платиной (100 нм) с адгезионными подслоем титана (10 нм). Исходный раствор метилцеллозольватов свинца, циркония и титана в метилцеллозоле с концентрацией 0.2 mol/l и соотношением компонентов  $\text{Pb}:\text{Zr}:\text{Ti}=1.05:0.53:0.47$  наносился на поверхность предварительно очищенных подложек методом центрифугирования при скорости вращения центрифуги 1500 оборотов в минуту. Сушка слоев осуществлялась на воздухе методом горячей пластины при температуре 160°С в течение 3 min с последующим отжигом в трубчатой кварцевой печи в токе кислорода при температуре 650°С в течение 10 min. Указанная процедура выполнялась последовательно 4 раза (по числу слоев в пленках). В качестве верхнего электрода использовались покрытия из никеля толщиной 100 нм и диаметром 100 мкм, наносимые на свободную поверхность пленок методом ВЧ-магнетронного распыления через маску. Подробное описание использованной технологии получения пленок и их кристаллической структуры приведено в [8].

Петли диэлектрического гистерезиса исследуемых конденсаторных структур измерялись по схеме Сойера-Тауера на синусоидальном напряжении частотой 1 kHz и амплитудой 5 В до начала и после окончания воздействия на структуры импульсного напряжения, использовавшегося для переключения поляризации пленок при исследовании их усталости. Типичный вид полученных петель диэлектрического гистерезиса показан на рис. 1, а.

Емкость  $C$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  исследуемых структур измерялись мостовым методом (мост ТМ-351-G фирмы Tesla) на синусоидальном напряжении той же частоты с амплитудой 100 мВ до начала и на различных этапах исследования их усталости при кратковременных (около 1 min) отключениях от структур импульсного напряжения. Электропроводность пленок измерялась на постоянном напряжении 5 В.

Импульсные измерения параметров переключения поляризации исследуемых конденсаторных структур проводились непосредственно в процессе их испытания на усталость в схеме с последовательно вклю-

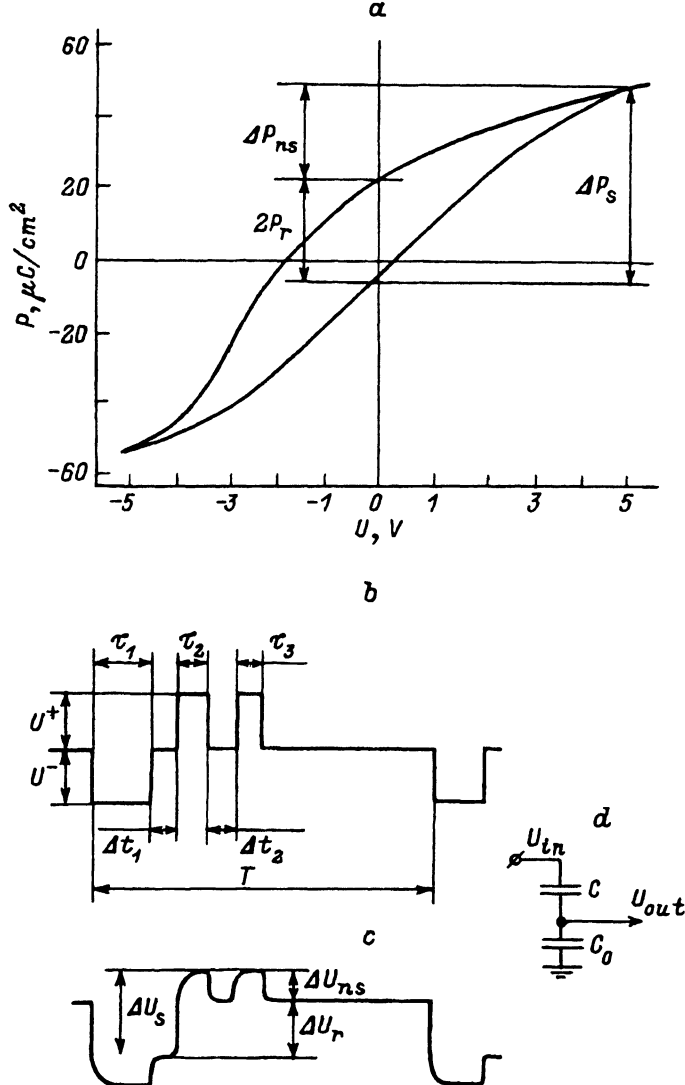


Рис. 1. Типичная петля диэлектрического гистерезиса (а) и диаграммы напряжений на входе (б) и выходе (с) схемы измерения (д) параметров поляризации сегнетоэлектрических конденсаторных структур Ni-ШТС-Pt/Ti-SiO<sub>2</sub>/Si в процессе исследования их усталости.

Использованные значения параметров импульсного напряжения  $|U^+| = |U^-| = 5 \text{ V}$ ,  $\tau_1 = 3 \text{ } \mu\text{s}$ ,  $\tau_2 = \tau_3 = 1.5 \text{ } \mu\text{s}$ ,  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = 1.5 \text{ } \mu\text{s}$ ,  $T = 10 \text{ } \mu\text{s} - 10 \text{ ms}$ . Напряжения  $\Delta U_s \approx \Delta P_s / C_0$ ,  $\Delta U_{ns} \approx \Delta P_{ns} / C_0$  и  $\Delta U_r \approx 2P_r / C_0$  характеризуют значения переключаемой  $\Delta P_s$ , неперключаемой  $\Delta P_{ns}$ , и остаточной  $2P_r$  поляризации соответственно,  $C_0 = 25 \text{ nF}$  — емкость нагрузочного конденсатора,  $C$  — емкость исследуемых структур.

ченным нагрузочным конденсатором ( $C_0 = 25 \text{ nF}$ ) по известной методике (см., например, [9]). В качестве источника импульсного напряжения использовался генератор типа Г5-56, с независимых выходов которого на исследуемые структуры подавалась последовательность прямоугольных импульсов различной полярности, показанная

на рис. 1, *b*. Одиночные импульсы отрицательной полярности длительностью  $\tau_1 = 3 \mu\text{s}$  и амплитудой  $5 \text{ V}$  использовались для установления в пленках исходного состояния поляризации, соответствующего насыщению поляризации в области отрицательных напряжений, как это видно из приведенной на рис. 1, *a* петли диэлектрического гистерезиса (выходы генератора присоединялись к верхнему никелевому электроду исследуемых структур). Следующие за отрицательным двойные положительные импульсы длительностью  $\tau_2 = \tau_3 = 1.5 \mu\text{s}$  и амплитудой  $5 \text{ V}$  использовались для определения значений «переключаемой»  $\Delta P_s$ , «непереключаемой»  $\Delta P_{ns}$  и «остаточной»  $2P_r = \Delta P_s - \Delta P_{ns}$  поляризации пленок, соответствующих, как это видно из приведенных на рис. 1, *a*, *c* обозначений, положительному полупериоду измерений петли диэлектрического гистерезиса. Численные значения указанных параметров поляризации пленок рассчитывались из величины соответствующих им сигналов  $\Delta U_s = A\Delta P_s/C_0$ ,  $\Delta U_{ns} = A\Delta P_{ns}/C_0$  и  $\Delta U_r = A2P_r/C_0$ , снимаемых с нагрузочного конденсатора  $C_0$  (рис. 1, *c*, *d*) в процессе исследования усталости структур с площадью верхнего электрода  $A$ . Частота следования импульсов изменялась в пределах от  $100 \text{ Hz}$  до  $100 \text{ kHz}$  (что соответствует изменению периода  $T$  от  $10 \text{ ms}$  до  $10 \mu\text{s}$ ) при неизменных значениях расстояний между импульсами  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = 1.5 \mu\text{s}$ .

## 2. Результаты измерений

Как видно из рис. 1, начальные значения поляризации насыщения исследуемых пленок, измеренные до подачи на изучаемые структуры импульсного напряжения, составляют величину около  $50 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , а удвоенные значения остаточной поляризации  $2P_r$  и коэрцитивного поля  $2E_c$  составляют соответственно около  $30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  и  $100 \text{ kV}/\text{cm}$ . Заметная асимметрия представленной здесь петли диэлектрического гистерезиса, физическая природа которой рассматривается в работах [8,10,11], обусловлена различием использованных материалов верхнего (никель) и нижнего (платина) электродов исследованных конденсаторных структур. Начальные значения емкости исследуемых структур, расположенных на поверхности одной кремниевой пластины и изготовленных в едином технологическом процессе, составляли  $400\text{--}450 \text{ pF}$ .

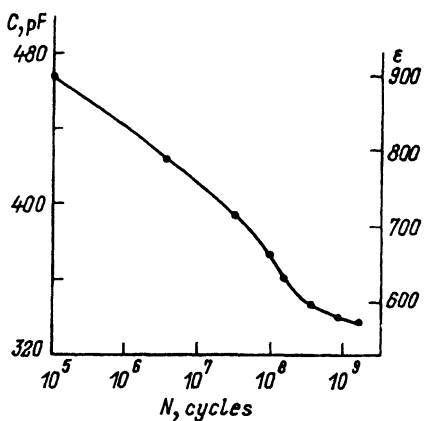


Рис. 2. Зависимость емкости  $C$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  тонких пленок ПТС от числа циклов переключения поляризации.

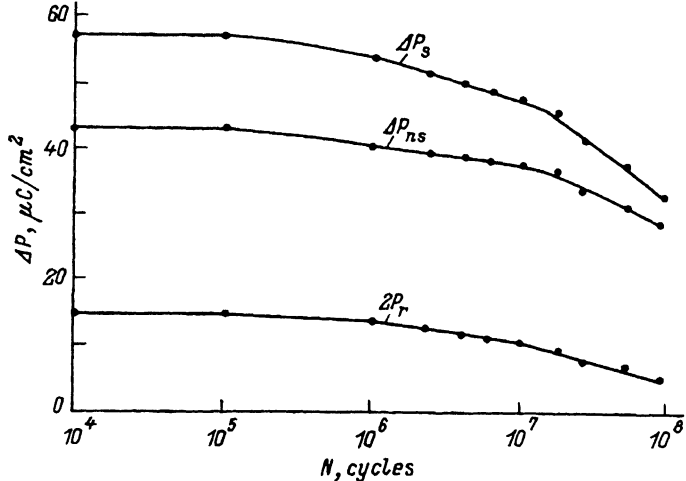


Рис. 3. Типичный характер зависимости параметров поляризации пленок от числа циклов переключения поляризации  $N$  (частота следования импульсов 50 kHz).

Обозначения те же, что и на рис. 1.

при величине  $\text{tg } \delta = (2-4)10^{-2}$ ; соответствующие им значения  $\epsilon$  (с учетом реальной площади верхнего электрода) составляли от 800 до 900. По мере воздействия на структуры импульсного напряжения наблюдалось монотонное уменьшение их емкости (рис. 2), достигающее значений  $\Delta C/C \cong 30\%$  после  $N \geq 10^8$  переключений поляризации пленок с частотой 50 kHz, в то время как наблюдаемые при этом изменения величины  $\text{tg } \delta$  не носили систематического характера. Интересной особенностью этих измерений оказалось то обстоятельство, что значения емкости изучаемых структур, измеряемые непосредственно после отключения от них импульсного напряжения, оказывались на 15-20% больше установившихся значений, релаксируя к ним в течение времени порядка 10 с.

Электропроводность пленок, измеренная на постоянном напряжении до и после подачи на них импульсного напряжения, не превышала значений  $10^{-10} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

Импульсные измерения параметров переключения поляризации пленок были проведены при значениях частоты следования импульсов  $f$  100 Hz, 1, 10, 50 и 100 kHz. В качестве иллюстрации на рис. 3 представлены типичные для исследованных структур зависимости параметров  $\Delta P_s$ ,  $\Delta P_{ns}$  и  $2P_r$  пленок от числа циклов переключения поляризации  $N$  с частотой  $f = 50$  kHz. Как видно из рис. 3, при увеличении  $N$  наблюдается характерное для усталости сегнетоэлектриков уменьшение величины переключаемой  $\Delta P_s$  и остаточной  $2P_r$  поляризации пленок при относительно более медленном уменьшении величины непереключаемой поляризации  $\Delta P_{ns}$ , обуславливающей изменение емкости исследуемых структур.

На рис. 4 приведены зависимости относительных значений параметра  $2P_r$ , определяющего величину удерживаемого заряда, от числа циклов переключения поляризации  $N$  (рис. 4, а) и от полного времени воздействия на структуры импульсов знакопеременного напряжения

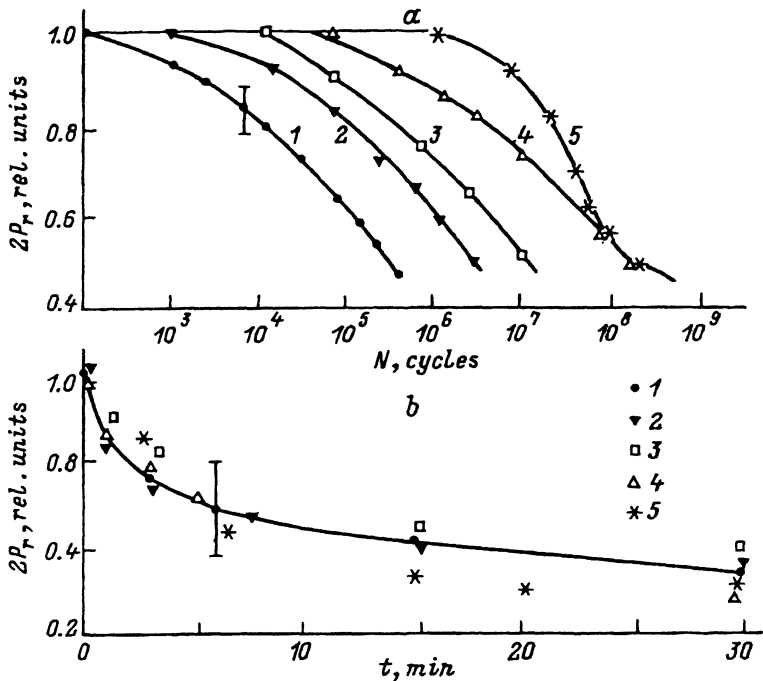


Рис. 4. Зависимость относительных значений остаточной поляризации  $2P_r$  от числа циклов переключения поляризации (а) и от полного времени воздействия на них разнополярными импульсами напряжения (б) при различных частотах следования импульсов  $f$ .

$f$  (kHz): 1 — 0.1, 2 — 1, 3 — 10, 4 — 50, 5 — 100. Здесь и на рис. 5 указан разброс данных, полученных для разных (номинально одинаковых) структур.

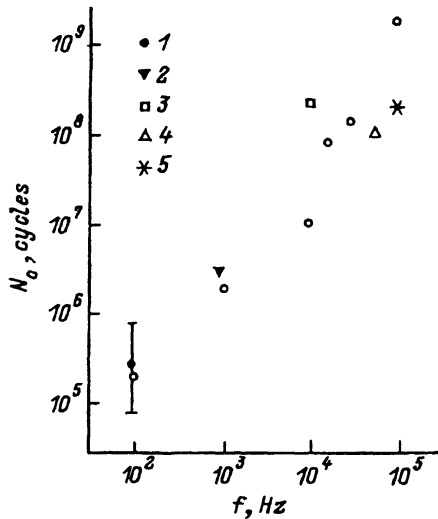


Рис. 5. Зависимость «критического» числа циклов переключения поляризации  $N_c$  соответствующего уменьшению величины переключаемого заряда  $2P_r$  в 2 раза, от частоты следования импульсов управляющего напряжения.

Обозначения те же, что и на рис. 4. Кружками обозначены данные [6].

$t = NT$  (рис. 4, *b*), измеренные при различных частотах следования импульсов. Сопоставление приведенных на рис. 4, *a* и *b* данных показывает, что при заметном отличии зависимостей  $2P_r$  от  $N$ , используемых обычно при описании усталости сегнетоэлектриков, зависимости величины  $2P_r$  от времени  $t$  оказываются практически одинаковыми для различных частот следования импульсов (в пределах разброса данных, наблюдавшегося при исследовании разных (номинально одинаковых) структур и обозначенного на рис. 4, 5 вертикальной чертой).

На рис. 5 приведены полученные нами зависимости «критического» числа циклов переключения поляризации  $N_c$ , соответствующего уменьшению величины  $2P_r$  в 2 раза, от частоты следования импульсов вместе с экспериментальными точками из работы [6]. Видно, что, несмотря на существенные различия использованных в настоящей работе и в работе [6] химического состава и технологии изготовления структур, а также методики измерения параметров поляризации, наблюдается достаточно хорошее совпадение полученных экспериментальных данных, свидетельствующих о наличии приблизительно линейной зависимости  $\lg N_c$  от  $\lg f$ .

### 3. Обсуждение результатов

Приведенные на рис. 4, 5 данные указывают на то, что усталость пленок определяется полным временем воздействия на исследуемые структуры импульсов знакопеременного напряжения  $t = NT$ , а не числом циклов переключения поляризации  $N$ , как это обычно принято считать. С учетом того, что суммарная длительность интервалов между импульсами в этих измерениях в большинстве случаев значительно превышала длительность самих импульсов, это указывает на то, что приводящие к усталости процессы протекают в основном в течение временных интервалов между импульсами, т.е. тогда, когда приложенное к пленкам напряжение отсутствует. При этом наиболее вероятной причиной протекания деградиационных процессов в пленках является поле деполяризации  $E_d$ , возникающее в сегнетоэлектриках после отключения от них внешнего напряжения при неполной компенсации их остаточной поляризации притекающими к электродам свободными зарядами [12]. Величина этого поля, направленного в сторону, противоположную полю от внешнего источника, определяется выражением, вытекающим из условия непрерывности вектора электрической индукции на границе раздела сегнетоэлектрик-электрод,

$$E_d = 4\pi(\rho_0 - P), \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — компенсирующий поляризацию сегнетоэлектрика  $P$  заряд, приходящийся на единицу поверхности каждого электрода. В случае полного отсутствия компенсации ( $\rho_0 = 0$ ) поле деполяризации достигает значений  $10^8$  V/cm (при характерных для рассматриваемых тонких пленок ПТС значениях остаточной поляризации  $P_r$  около  $10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ); при отличии компенсирующего заряда от величины  $P_r$  всего на 0.1% поле деполяризации составляет величину порядка  $10^5$  V/cm, близкую к величине коэрцитивного поля в этих пленках. В сегнетоэлектрической пленке с закороченными металлическими электродами компенсация в принципе должна быть полной, т.е.  $E_d = 0$ , однако при наличии

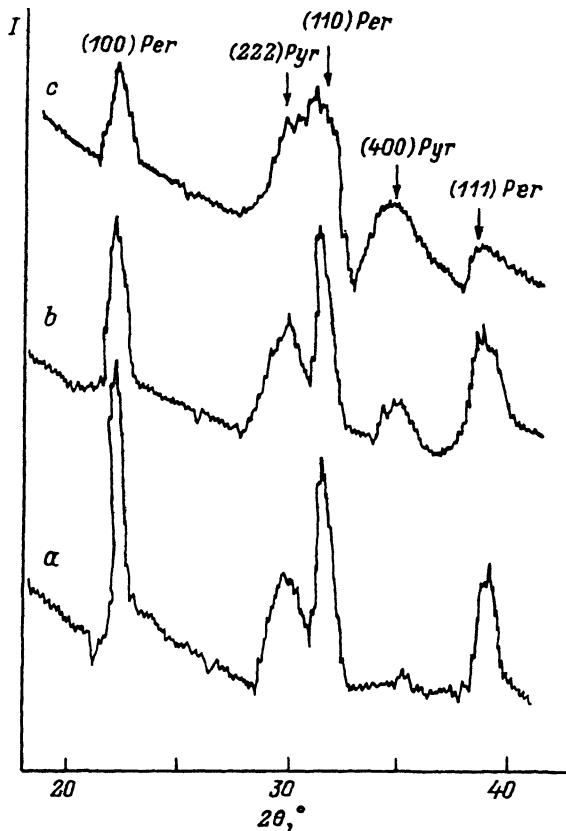


Рис. 6. Рентгеновские дифрактограммы тонких пленок ПТС, полученные при углах падения лучей относительно поверхности пленок, равных 7 (а), 5 (b) и 3° (с).

Уменьшение угла падения, эквивалентное уменьшению глубины проникновения рентгеновских лучей в объем пленок, сопровождается возрастанием относительной интенсивности отражений от поверхностных слоев со структурой пирохлора Pyr по сравнению с отражениями от структуры перовскита Per в объеме пленок.

в приэлектродных областях пленок переходных слоев толщиной около 10 нм с отличным от нуля градиентом вектора поляризации [9] или прослоек материала, не обладающих сегнетоэлектрическими свойствами, компенсация остаточной поляризации пленок оказывается неполной, и поле  $E_d$  может оказаться достаточно большим [12].

Выполненные нами исследования послойной структуры пленок методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа показали наличие таких прослоек, образующихся у свободной поверхности пленок в процессе их кристаллизационного отжига и имеющих структуру пирохлора. В качестве иллюстрации на рис. 6 приведены рентгенограммы пленок ПТС, измеренные при углах падения рентгеновских лучей относительно поверхности пленок 7, 5, 3°, соответствующих различной глубине проникновения рентгеновских лучей в объем пленки. Видно, что при уменьшении угла падения рентгеновских лучей, что эквивалентно уменьшению толщины анализируемых поверхностных слоев пленок за счет эффекта экстинкции от ~ 200



до  $\sim 85$  nm, наблюдается увеличение относительной интенсивности отражений, соответствующих структуре пироклора (в области углов отражения  $2\theta = 30$  и  $35^\circ$ ), по сравнению с отражениями от структуры перовскита в объеме пленок. Как показали измерения, выполненные методом просвечивающей электронной микроскопии, толщина приповерхностных областей пленок с преобладающим содержанием фаз со структурой пироклора составляет 40–50 nm. Следует отметить, что образование подобных прослоек фаз со структурой пироклора у свободной поверхности пленок ЦТС, полученных золь-гель-методом, в результате частичной диссоциации материала пленок в процессе их кристаллизационного отжига отмечалось и в ряде других работ (см., например, [13,14]); при этом в [13] отмечалось заметное ускорение усталости пленок по отношению к пленкам ЦТС, не имевшим указанных прослоек.

В работе [12] рассмотрен случай сегнетоэлектрика, помещенного между двумя закороченными полупроводниковыми электродами, находящимися в состоянии теплового равновесия, и показано, что для оценки величины  $E_d$  в этом случае может быть использовано выражение

$$E_d = (2kT/dq) \ln(2\pi\rho_0^2/\varepsilon n_i kT), \quad (2)$$

где  $d$  — толщина пленки,  $q$  — заряд электрона,  $\varepsilon$  и  $n_i$  — диэлектрическая проницаемость и концентрация свободных носителей в материале электродов соответственно. Если рассматривать указанные выше прослойки со структурой пироклора в приэлектродных областях пленок в качестве полупроводниковых электродов для остальной (сегнетоэлектрической) части пленок, то при подстановке в формулу (2) разумных значений параметров ( $\rho_0 \cong P_\tau \cong 10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $n_i \cong 10^{10} \text{cm}^{-3}$  и  $\varepsilon \cong 10$ ) получаем оценку величины  $E_d$  в наших пленках около  $10^5 \text{V}/\text{cm}$ , превышающую значения коэрцитивного поля пленок  $E_c \cong 5 \cdot 10^4 \text{V}/\text{cm}$  и близкую к напряженности электрического поля, создаваемого в пленках приложенным к ним напряжением от внешнего источника. С учетом логарифмической зависимости  $E_d$  от  $n_i$  это заключение оказывается справедливым и при существенно более высокой проводимости приэлектродных слоев пленок, как это предполагается в работах [15,16]. Следует отметить, что использование для оценки величины  $E_d$  выражения (2) предполагает компенсацию остаточной поляризации пленок зарядами, притекающими к электродам из внешней цепи (так называемая «внешняя компенсация» [12]), а не собственными свободными носителями сегнетоэлектрика в объеме пленок («внутренняя компенсация»). Основанием для использования этого выражения в рассматриваемом случае служит тот факт, что необходимое для внутренней компенсации время  $\tau \cong \rho_0/\sigma E_d \geq 1 \text{s}$  значительно превышает длительность интервалов между импульсами напряжения в описанных выше измерениях, тогда как время  $\tau' \cong RC$ , необходимое для перетекания зарядов между обкладками конденсаторных структур по внешней цепи (где  $R = 5 \cdot 10^5 \Omega$  — последовательное сопротивление в цепи разряда емкости  $C$ ), составляет величину порядка  $10^{-4} \text{s}$ , соизмеримую с длительностью указанных интервалов.

Предлагаемое в настоящей работе объяснение наблюдаемой зависимости скорости деградации пленок от частоты переключений поляризации, отвечая на вопрос о том, когда происходит деградация (в

основном в интервалах между импульсами приложенного напряжения) и под действием каких полей (поля деполяризации), вместе с тем не дает прямого ответа на вопрос о микроскопической природе явлений, ответственных за усталость. Отмеченный выше релаксационный характер изменения емкости конденсаторных структур, измеряемой в «слабых» электрических полях (т.е. в полях, меньших коэрцитивного) непосредственно после прекращения воздействия на структуры разнополярными импульсами управляющего напряжения (уменьшение емкости на 15–20% в течение 5–20 s), так же как и вызываемое усталостью пленок уменьшение переключаемого заряда, может быть объяснен в рамках классической модели пиннинга доменных стенок подвижными заряженными дефектами [5]. В качестве таковых могут выступать кислородные вакансии  $V^{++}$ , образующиеся в пленках под действием электрических полей (и в первую очередь поля деполяризации) в результате электрохимического восстановления ЦТС и распада малоподвижных заряженных комплексов дефектов типа  $[A^-V^{++}]^+$ , где символом  $A^-$  обозначен отрицательно заряженный ион акцептора [2]. При этом наблюдаемое в процессе усталости пленок уменьшение переключаемого заряда обусловлено выключением из процесса переключения поляризации части доменов, стабилизирующихся в структурах типа «голова к голове» и «хвост к хвосту» за счет накопления на их границах заряженных дефектов, в то время как уменьшение диэлектрической проницаемости пленок определяется уменьшением (по той же причине) подвижности доменных стенок [5], сохранивших способность к перемещению под действием прикладываемых к пленкам электрических полей.

В пользу заключения о существенной роли пиннинга доменных стенок в процессе усталости сегнетоэлектрических тонких пленок свидетельствует, по мнению авторов работы [17], и восстановление исходных параметров пленок (их «омоложение») после воздействия на пленки низкочастотным (1 kHz) синусоидальным напряжением. Сказанное не исключает, однако, и возможности накопления заряженных дефектов в приэлектродных областях пленок с образованием там областей объемного заряда, также способных приводить к усталости сегнетоэлектрических тонких пленок [2,13,16].

Изложенные выше представления о существенной роли в процессе усталости пленок поля деполяризации, действующего в течение временных интервалов между импульсами приложенного напряжения, позволяют объяснить некоторые особенности процесса усталости, не находившие ранее удовлетворительного объяснения. В их числе кроме рассмотренной в настоящей работе зависимости усталости пленок от частоты переключений поляризации следует указать на отмеченную в [13] независимость скорости деградации пленок от длительности импульсов приложенного к ним знакопеременного напряжения в широком диапазоне значений (от 0.5  $\mu$ s до 0.4 ms).

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена важная роль в процессах усталости сегнетоэлектрических тонких пленок полей деполяризации, возникающих в пленках в результате неполной компенсации их остаточной поляризации свободными носителями при образовании в приэлектродных областях пленок фаз, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами.

Авторы выражают благодарность С.В.Штельмах и Г.Н.Мосиной за проведенные ими исследования структуры пленок, а также Б.М.Гольцману за помощь в проведении измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 95-02-04177-а).

### Список литературы

- [1] H.M. Duicker, P.D. Beale, J.F. Scott, C.A.P. De Araujo, B.M. Melnick, J.D. Cuchiaro, L.D. McMillan. *J. Appl. Phys.* **68**, 5783 (1990).
- [2] S.B. Desu, I.K. Yoo. *Integr. Ferroelectrics* **3**, 365 (1993).
- [3] S.L. Miller, R.D. Nasby, J.R. Schwank, M.S. Rodgers, P.V. Dressendorfer. *J. Appl. Phys.* **68**, 6463 (1990).
- [4] D.J. Taylor, P.K. Larsen, G.J.M. Dormans, A.E.M. de Veirman. *Integr. Ferroelectrics* **7**, 123 (1995).
- [5] А.Ю. Кудзин, Т.В. Панченко. *ФТТ* **14**, 1843 (1972).
- [6] R. Ramesh, W.K. Chan, B. Wilkens, T. Sands, J.M. Tarascon, V.G. Keramidas, J.T.Evans, Jr. *Integr. Ferroelectrics* **1**, 1 (1992).
- [7] V.V. Lemanov, Yu.V. Frolov, A.A. Iofan, V.K. Yarmarkin. *Proc. 1st. Eur. Meet. Integr. Ferroel. (EMIF-1). Abstracts. Nijmegen (1995)*. P. 37.
- [8] В.К. Ярмаркин, Н.В. Зайцева, С.В. Штельмах, А.В. Моторный. *ФТТ* **37**, 2, 324 (1995).
- [9] J.M. Benedetto, R.A. Moore, F.B. McLean. *J. Appl. Phys.* **75**, 460 (1994).
- [10] V.V. Lemanov, N.V. Zaitseva, S.V. Shtel'makh, A.V. Motorny, V.K. Yarmarkin. *Ferroelectrics* **170**, 231 (1995).
- [11] J.J. Lee, S.B. Desu. *Ferroelectrics Lett.* **20**, 27 (1995).
- [12] P. Würfel, I.P. Batra. *Ferroelectrics* **12**, 55 (1976).
- [13] Cz. Pawlaczyk, A.K. Tagantsev, K. Brooks, I.M. Reaney, R. Klissurska, N. Setter. *Integr. Ferroelectrics* **8**, 293 (1995).
- [14] W.A. Geideman, S.Y. Wu, L.E. Sanchez, B.P. Maderic, W.M. Lin, I.K. Naik, S.H. Watanabe. *Proc. 7-th Int. Symp. Appl. Ferroel. (ISAF'7). Urbana-Champaign (1990)*. P. 258.
- [15] T. Mihara, H. Watanabe, H. Yoshimori, C.A.P. De Araujo, B. Melnick, L.D. McMillan. *Integr. Ferroelectrics* **1**, 269 (1992).
- [16] C.J. Brennan. *Integr. Ferroelectrics* **2**, 73 (1992).
- [17] M. de Keijser, J.F.M. Cillessen, R.B.F. Janssen, A.E.M. de Veirman, D.M. de Leeuw. *J. Appl. Phys.* **79**, 393 (1996).