

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ СЛОЕВ НА ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ЦТС

Для решения задачи подбора оптимальных режимов формирования сегнетоэлектрических пленок методом химического осаждения из растворов и для исследования влияния переходных слоев, были проведены измерения вольт-фарадных характеристик.

Вольт-фарадные измерения выполнялись в результате приложения постоянного напряжения к емкости ЦТС. На рис. 6.1 представлена полученная нами типичная для исследованных структур зависимость емкости от величины постоянного напряжения смещения. Обращает на себя внимание асимметрия этой зависимости, отражающая асимметрию формы петли диэлектрического гистерезиса.

Измерения диэлектрической проницаемости проводились в диапазоне температур от 30°C до 200°C и развертке напряжения в диапазоне от -8 до 8 В со скоростью около 0,1В/с. Семейство полученных вольт-фарадных характеристик структур с пленками ЦТС при варьировании температур приведено на рис. 6.2.

Соответствующие вольт-фарадные измерения были проведены при варьировании избыточного количества свинца в исходных компонентах. Исследовались образцы, полученные при различных температурах отжига и при различном содержании свинца в исходных компонентах растворов. Избыточного количества свинца в исходных компонентах варьировалось от 0 до 50% молярного объема, а температура последующей термической обработки изменялась в пределах 500...750°C. Результаты этих измерений представлены на рис. 6.3. Полученные характеристики сильно зависят как от технологических режимов изготовления слоистых структур, так и от избыточного содержания свинца в исходных растворах. Показано что наилучшие характеристики достигаются при температуре отжига около 650°C и при 10% избыточном содержании свинца. Эти данные также подтверждаются полученными позднее результатами рентгеноскопического анализа [1] и данными наблюдений растровой электронной микроскопии [3].

Отличие вольт-фарадных характеристик реальных структур металл—SiO₂—Si (МОП) от соответствующих зависимостей идеальных МДП-конденсаторов обусловлено существованием поверхностных ловушек и зарядов в окисле [99].

В настоящее время принята следующая классификация этих зарядов и ловушек:

1. Заряд, захваченный поверхностными ловушками Q_{it} , представляющий собой заряд электронных состояний, которые локализованы на границе раздела Si—SiO₂ и энергия которых лежит в глубине запрещенной зоны полупроводника. Эти поверхностные состояния, называемые также быстрыми (а иногда пограничными), могут

Типичная вольт-фардная характеристика структуры с пленой ЦТС

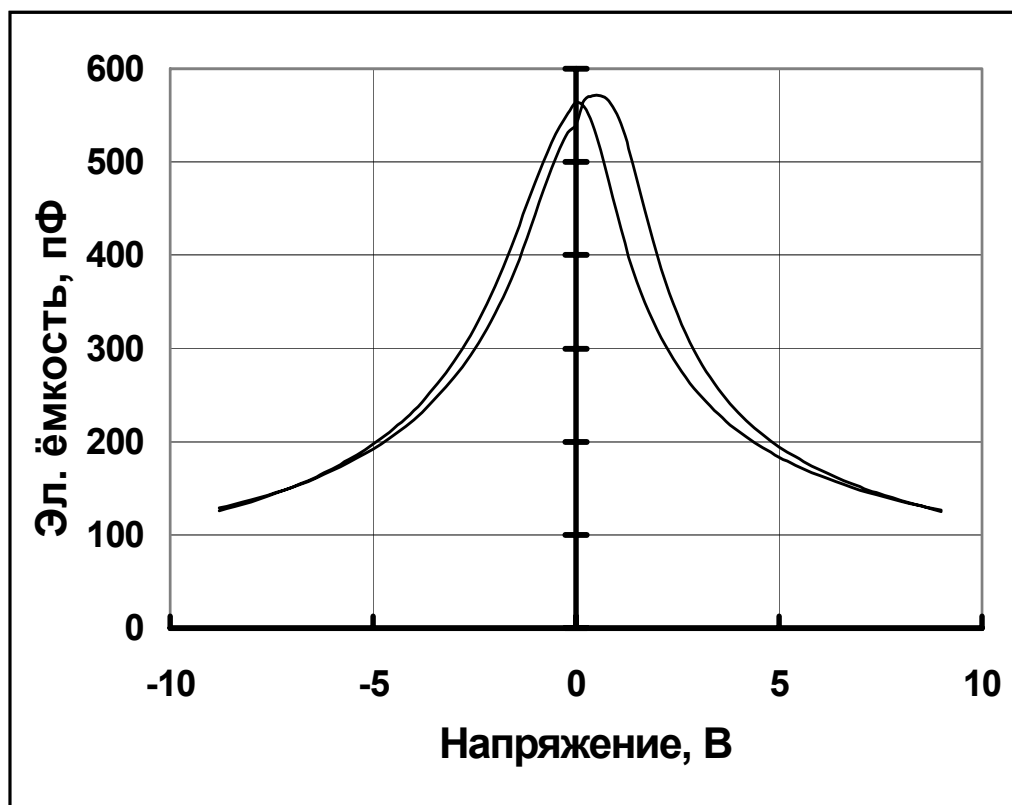


Рис. 6.1

Семейство вольт-фардных характеристик пленки ЦТС в диапазоне температур от 20°C до 120°C

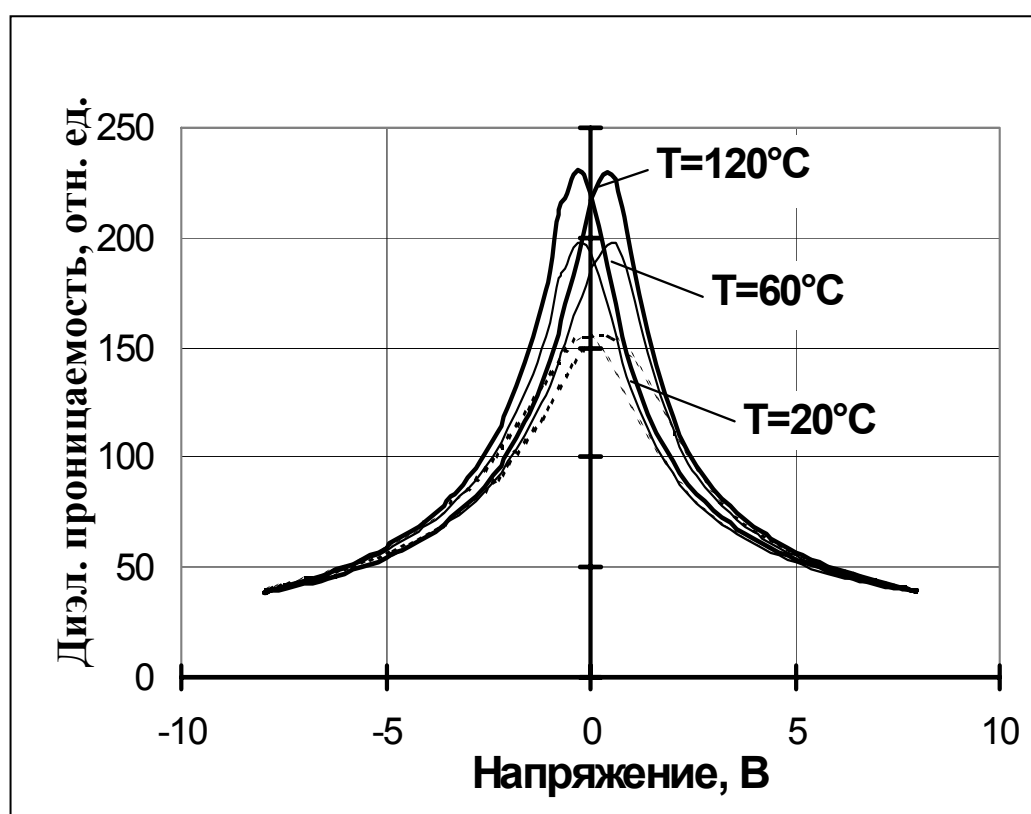


Рис. 6.2

Семейство вольт-фардных характеристик пленок ЦТС в зависимости от содержания свинца в исходных компонентах

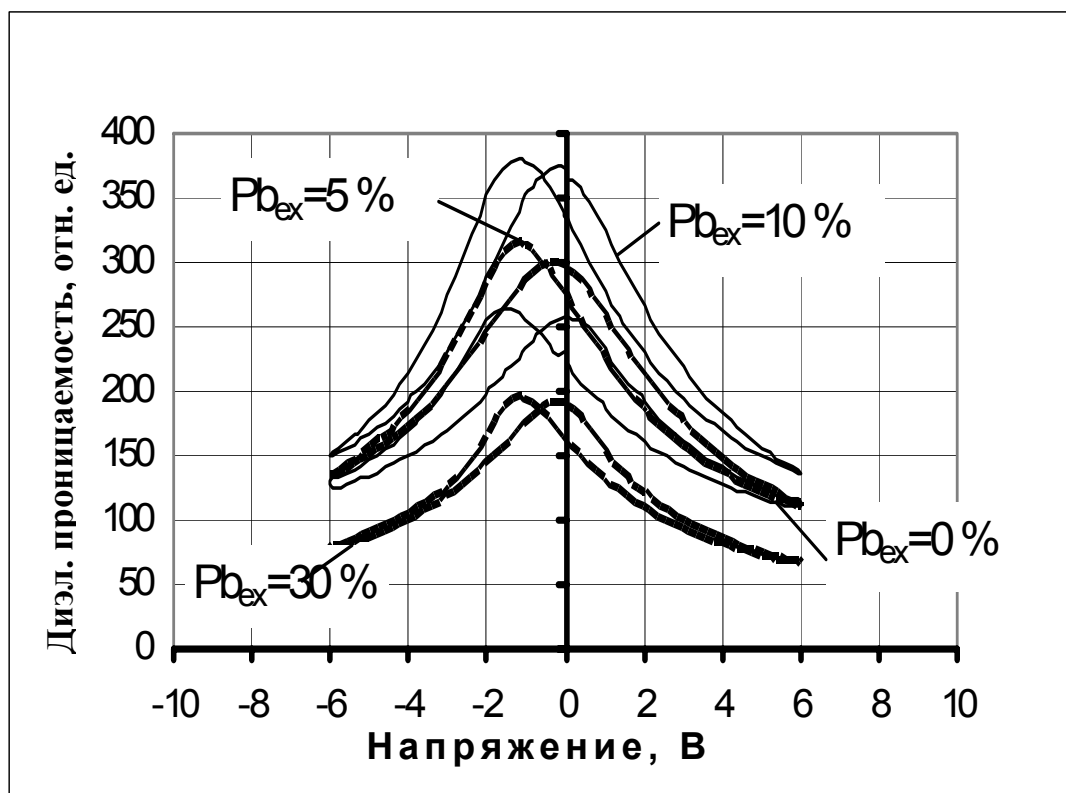


Рис. 6.3

достаточно быстро перезаряжаться, обмениваясь электронами (дырками) с кремнием. Поверхностные состояния, вероятно, обусловлены избыточными атомами кремния (трехвалентным кремнием), избыточным кислородом или примесными атомами.

2. Фиксированный заряд окисла Q_f , расположенный на границе раздела или в непосредственной близости от нее. Величина этого заряда остается практически постоянной во всей области электрических полей, характерных для рабочего диапазона напряжений на МОП-структурах.

3. Заряд, захваченный в окисле Q_{ot} . Этот заряд возникает, например, при рентгеновском облучении структур или инжекции горячих электронов в диэлектрик. Соответствующие ловушки более или менее равномерно распределены по толщине слоя окисла.

4. Заряд подвижных ионов Q_m , который может перемещаться в слое окисла при стрессовых термополевых нагрузках МДП-структур.

Величину всех этих зарядов обычно относят к единице площади границы раздела, т. е. измеряют в единицах Кл/см². Вместо Q_i часто используют соответствующие поверхностные плотности, которые обозначают символом N_i , с теми же индексами ($N_i=Q/q$ —число зарядов на 1 см²). Поскольку энергетические уровни состояний, захватывающих поверхностный заряд Q_{it} , непрерывно распределены в запрещенной зоне полупроводника, полезной характеристикой является энергетическая плотность поверхностных состояний D_{it} (число зарядов/см² × эВ).

Основная причина возникновения этих состояний в запрещенной зоне полупроводника заключается в том, что сама граница раздела является нарушением пространственной периодичности кристаллической решетки.

В современных МДП-структурах, получаемых термическим окислением кремния, подавляющая часть поверхностного заряда нейтрализуется в процессе низкотемпературного (450°С) отжига в атмосфере водорода. В лучших образцах величина N_{it} не превышает 10¹⁰ см⁻², что соответствует одному захваченному заряду на каждые 10⁵ атомов границы раздела.

При изменениях приложенного к МДП-структуре напряжения положение энергетических уровней поверхностных ловушек изменяется. В результате происходит изменение зарядового состояния этих ловушек (в первом приближении можно считать, что оно происходит, когда энергетический уровень ловушки пересекает уровень Ферми). Изменение поверхностного связанного заряда дает дополнительный вклад в дифференциальную емкость МОП-структуры, в результате чего вольт-фарадная характеристика последней отличается от $C-V$ -зависимости идеальной МДП-структуры. Для определения величины заряда, захваченного на поверхностные ловушки, нужно использовать измерения входной емкости МДП-структуры и измерения ее входной проводимости.

Преимущество емкостного метода состоит в том, что с его помощью можно сравнительно легко определять сдвиг напряжения плоских зон и

величину полного захваченного заряда Q_{it} (интегральную плотность поверхностных состояний).

На основании полученных нами данных по диэлектрическим измерениям в структурах сегнетоэлектрических пленок и по результатам анализа публикаций [100] в рамках данной работы была предложена методика исследования эффектов в переходных слоях между сегнетоэлектрической пленкой и металлическими электродами. Итак, для исследований применялись образцы тонких сегнетоэлектрических пленок цирконата-титаната свинца (ЦТС) (Zr/Ti (0.52/0.48)). Схематическое изображение исследуемых структур пленок ЦТС показано на рис. 6.4.

Здесь, мы используем модель, согласно которой структуру СЭ с электродами можно представить в виде последовательной цепи состоящей из собственно СЭ емкости и двух последовательных емкостей верхнего и нижнего переходного слоя на границах диэлектрик-металл.

Для больших значений приложенного напряжения, когда переключение поляризации уже произошло, емкость самого сегнетоэлектрика уже не зависит от напряжения. В этом случае ход вольт-фарадных характеристик определяется емкостной зависимостью переходного слоя и, согласно предложенной нами модели основной вклад дает зависимость обратносмещенного барьера Шоттки, образованного на границе раздела металл-сегнетоэлектрик. В этом случае для данной модели справедливо соотношение, в котором емкость переходного слоя обратно пропорциональна корню от приложенного напряжения (барьер Шоттки)[99]:

$$\left(\frac{1}{C_b}\right)^2 = \frac{2U_b^{t,b}}{q\varepsilon\varepsilon_0 N_b^{t,b} S}, \quad (6.1)$$

где:

S - площадь поверхности электрода;

$N_b^{t,b}$ - плотность поверхностных состояний;

$U_b^{t,b}$ - приложенное напряжение;

q - заряд электрона;

ε -относительная диэлектрическая проницаемость;

ε_0 -диэлектрическая проницаемость вакуума.

Параметры этой модели определялись на основе данных измерений вольт-фарадных характеристик структур с пленками ЦТС.

Используя метод предложенный Lee [100], основываясь на части кривой, когда переключение поляризации уже произошло, и емкость самого СЭ не зависит от напряжения, в соответствии с соотношением (6.1) из графика зависимости $1/C^2$ от приложенного напряжения были вычислены параметры переходного слоя. В частности, при сильном смещении зависимость обратной емкости определяется в основном емкостью на верхнем обратносмещенном переходном слое. Пример перестроенной вольт-фарадной характеристики в зависимости квадрата обратной емкости от напряжения показан на рис. 6.5.

Схематическое изображение исследуемых структур пленок ЦТС

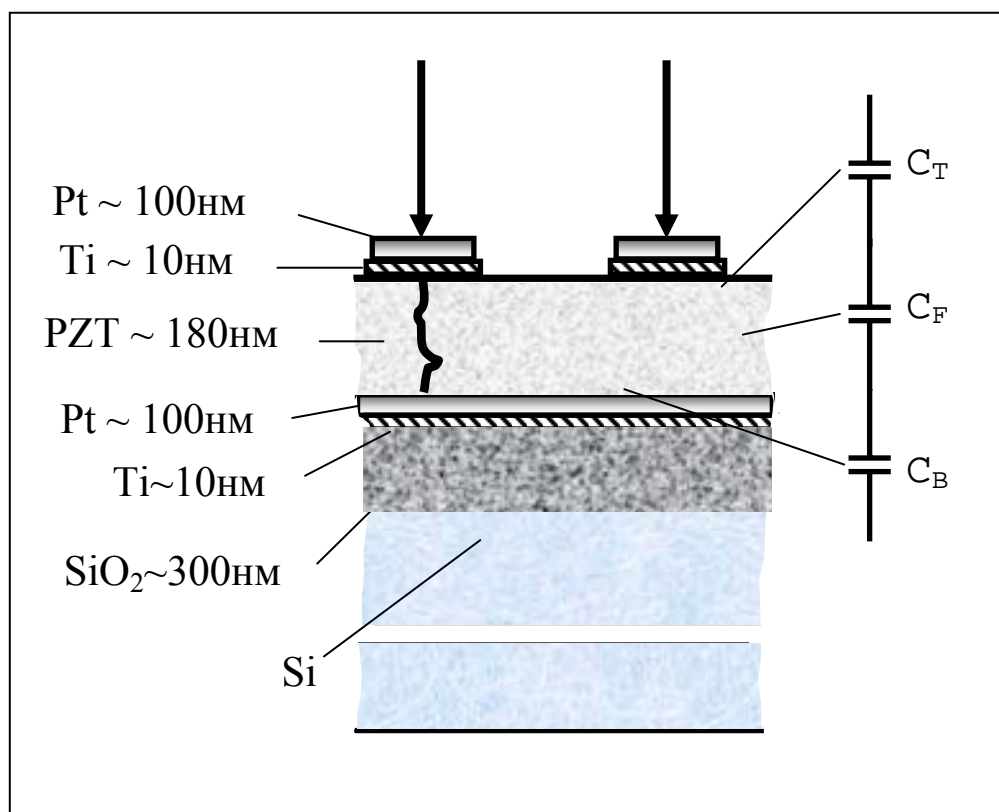


Рис. 6.4

Определение параметров модели по перестроенной вольт-фарадной характеристике

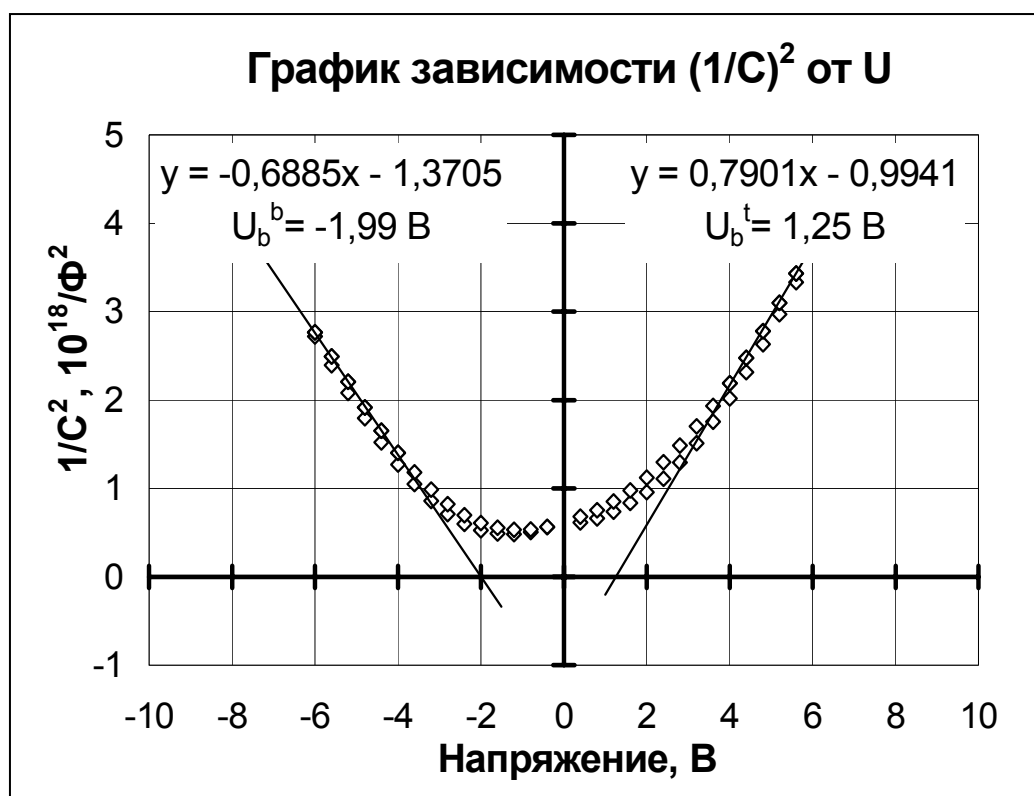


Рис. 6.5

Методика определения параметров модели основывалась на определении коэффициентов линейной регрессии из графика вольт-фарадной характеристики в единицах квадрата обратной емкости ($1/C^2$). В результате для исследуемых образцов пленок определены падения напряжения в переходных слоях, образующиеся в результате наличия встроенных зарядов, а также оценены значения плотностей поверхностных состояний в них. Полученные данные обобщены в таблице 6.1.

Как видно, соответствующие падения напряжения на промежуточном слое сильно зависят как от технологических режимов изготовления слоистых структур, так и от избыточного содержания свинца в исходных растворах, и могут изменяться от десятых долей вольт до нескольких вольт.

Различие между падениями напряжений на верхнем и нижнем переходном слое U_b^b и U_b^t является следствием асимметричных встроенных в приповерхностные области зарядов из-за внутренних электрических полей, направленных к верхнему электроду. Этим можно объяснить наблюдавшиеся смещения и асимметрию гистерезисных кривых. На основе полученных данных по падениям напряжения в переходных слоях можно уточнить вид гистерезисных кривых, принимая во внимание, что только часть приложенного внешнего напряжения приложена непосредственно к сегнетоэлектрику и участвует в переключении поляризации.

Предложенная методика может быть применена для определения влияния материалов электродов на характеристики микроэлектронных сегнетоэлектрических структур, предназначенных для микросхем памяти и многоэлементных пироэлектрических приемников излучения.

Таблица 6.1

Таблица зависимости плотности поверхностных состояний от процентного содержания свинца в исходных компонентах

T=30°C				
Pb, %	U_b^t, В	U_b^b, В	N_b^t, 10²⁶/м³	N_b^b, 10²⁶/м³
0	0,22	-0,99	4,49	5,09
5	0,93	-1,65	2,40	2,83
10	1,7	-1,13	10,2	9,93
30	-1,75	1,68	2,29	3,75
T=100°C				
Pb, %	U_b^t, В	U_b^b, В	N_b^t, 10²⁶/м³	N_b^b, 10²⁶/м³
0	0,51	-1,14	4,56	5,22
5	1,2	-1,76	2,51	2,83
10	1,95	-1,42	8,43	8,04
30	-1,56	4,86	0,34	0,26