



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 541.183

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11266>

**Влияние температуры на межфазный слой  
в МОП-структурах (Pt/TiO<sub>2</sub>/Si)**

**Х. Д. Чандрашекхара** ✉, П. Пурнима

Государственный научный колледж (автономный), физический факультет,  
Хассан 573201, Карнатака, Индия

**Аннотация**

В данной работе представлены вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики МОП-структуры (Pt/TiO<sub>2</sub>/Si). В рамках вольт-амперных характеристик (ВАХ) оценивались различные электрические параметры, такие как коэффициент идеальности ( $n$ ), высота барьера ( $\Phi_b$ ), ток утечки ( $I_c$ ) и ток насыщения ( $I_0$ ), которые в дальнейшем анализировались с помощью функций Чонга.

Установлено, что данные электрические параметры изменяются в зависимости от термообработки. Были оценены и проанализированы вольт-фарадные характеристики (ВФХ), напряжение плоских зон ( $V_{FB}$ ), поверхностная плотность ловушек ( $D_{it}$ ), эффективная концентрация носителей заряда ( $N_{eff}$ ) и величина захваченного заряда в оксиде ( $Q_{OT}$ ). Изменение данных величин в зависимости от температуры отжига было связано с реструктуризацией и перегруппировкой атомов TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> на границе раздела металл/кремний. Петля гистерезиса при напряжении против часовой стрелки от –1 В до 1 В на частоте 1 МГц после термообработки при 600 °С показывает область интенсивного накопления, что может быть связано с уменьшением поверхностного захваченного заряда и свободных связей.

**Ключевые слова:** ток утечки, коэффициент идеальности, напряжение плоских зон, захваченный заряд в оксиде

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность Центру нанонауки и инженерии (CeNSE) за участие в Программе пользователей нанoeлектроники Индии. Один из авторов (Х. Д. Чандрашекхара) благодарит всех сотрудников Государственного научного колледжа Хассан за моральную поддержку при выполнении исследовательской работы.

**Для цитирования:** Чандрашекхара Х. Д., Пурнима П. Влияние температуры на межфазный слой в МОП-структурах (Pt/TiO<sub>2</sub>/Si). *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(3): 415–423. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11266>

**For citation:** Chandrashekara H. D., Poornima P. Temperature influences of the interfacial layer in MOS (Pt/TiO<sub>2</sub>/Si) structures. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(3): 415–423. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11266>

✉ Чандрашекхара Х. Д., e-mail: [chandruhdcs@gmail.com](mailto:chandruhdcs@gmail.com)

© Чандрашекхара Х. Д., Пурнима П., 2023



## 1. Введение

Ширина запрещенной зоны SiO<sub>2</sub> составляет около 9 эВ, а плотность ловушек в объеме материала низкая, поэтому ток, проходящий через диэлектрический слой, является низким. Толщина оксидов увеличивается с уменьшением плотности тока утечки. Другие оксидные материалы с более высокой диэлектрической проницаемостью подходят для оптимизации тока утечки, плотности ловушек и свободных связей. Диоксид титана (TiO<sub>2</sub>) обладает множеством полезных свойств и применяется в различных областях. Например, он обладает высокой фотокаталитической активностью, используется в газоанализаторах, в качестве изолятора затвора и в солнечных батареях. Тонкие пленки TiO<sub>2</sub> легко осаждаются на поверхности Si/SiO<sub>2</sub> и играют важную роль во всех полупроводниковых устройствах. Однако TiO<sub>2</sub> в качестве изолятора затвора показывает более высокий ток утечки из-за большей ширины запрещенной зоны и большего разрыва зоны, чем SiO<sub>2</sub> и кремниевая подложка. Анатазная фаза может быть получена при температуре 350 °С, а при более высокой температуре 800 °С она переходит в более стабильную фазу рутила [1]. Фазовое превращение из аморфной структуры в кристаллический анатаз может происходить в осажденных пленках после отжига из-за изменения границ зерен, плотности упаковки и дефектов [2, 3]. Тонкие пленки TiO<sub>2</sub> получены с использованием разнообразных методов, таких как CVD [4], высокочастотное напыление [5], атомно-слоевое осаждение [6], золь-гель [7], напыление [8], импульсное лазерное осаждение [9] и спрей-пиролиз [10, 11]. Среди вышеупомянутых методов синтеза пленок TiO<sub>2</sub> спрей-пиролиз является наиболее распространенным благодаря его простоте, рентабельности, пригодности для экономически эффективного, массового производства и удобству использования. МОП-структуры представляют собой своего рода конденсатор, который накапливает электрический заряд благодаря диэлектрическим свойствам изолирующих слоев. Из-за наличия оксидного слоя и двух областей поверхностного заряда физика МОП сложнее физики поверхности полупроводников. За последние четыре десятилетия были проведены обширные исследования границы раздела полупроводник/изолятор (Si/TiO<sub>2</sub>) и дефектов в этой области, так как они имеют большое значение в кремниевой технологии. В целом, необходимо учитывать несколько воз-

можных источников погрешностей, которые вызывают отклонения от идеального поведения МОП, например, электрические свойства. Изучение вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик при комнатной температуре не дает полной информации о процессе переноса заряда на границе раздела Si/TiO<sub>2</sub>. Зависимые от температуры электрические характеристики позволяют получить информацию о процессе переноса заряда через МОП-контакты, а также лучше понять механизмы проводимости [12]. Плотность тока утечки тонких пленок TiO<sub>2</sub> можно дополнительно уменьшить в результате отжига в различных газовых средах, таких как O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O и N<sub>2</sub>. Наиболее распространенным является отжиг в воздушной среде, поскольку он улучшает структурную упорядоченность, диэлектрическую проницаемость и уменьшает количество дефектов. В данной статье рассматривается осаждение тонкой пленки TiO<sub>2</sub> с последующим отжигом [13]. Данные структуры активно изучались в последние четыре десятилетия благодаря наличию оксидного слоя (TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>) и двух областей границ раздела металл/оксид и кремний/оксид. Эпитаксиальный рост тонких пленок TiO<sub>2</sub>, осажденных с помощью импульсной лазерной абляции, способствовал дальнейшему улучшению тонких пленок в качестве МОП Ni/*n*-TiO<sub>2</sub>/*p*-Si для выпрямляющего контакта [14]. МОП структуры Pt/TiO<sub>2</sub>/Si демонстрируют диэлектрическую проницаемость тонкой пленки TiO<sub>2</sub>, осажденной между кремниевой подложкой и платиновым электродом. Рост межфазного слоя, по-видимому, связан с уменьшением количества кислородных вакансий. Показатели МОП-структур отличаются от эталонного случая из-за влияния поверхностной плотности ловушек, эффективной плотности заряда в оксиде и локализованных поверхностных состояний. Следовательно, механизм тока утечки в конденсаторе на основе МОП-структур (Pt/TiO<sub>2</sub>/Si) при высоком электрическом поле и при высокой температуре обусловлен эмиссией Шоттки.

## 2. Экспериментальная часть

Тонкие пленки TiO<sub>2</sub> получены методом спрей-пиролиза при оптимальных условиях с использованием изопропоксида титана (IV) в качестве исходного материала, ацетилацетоната в качестве комплексообразователя и абсолютного этанола в качестве растворителя. Перед осаждением кремниевые пластины (100) были

очищены с помощью смесей RCA-1 и RCA-2 [15]. Тонкие пленки TiO<sub>2</sub> осаждались при температуре подложки 350 °С с использованием 0.1 моль раствора прекурсора TiO<sub>2</sub>. После осаждения проводился изохронный отжиг при различных температурах: 400, 500 и 600 °С в течение 30 мин в воздушной среде. Электрические параметры были определены путем измерения ВАХ и ВФХ осажденных пленок. Электрические контакты были изготовлены путем осаждения платины через маску на поверхность слоя TiO<sub>2</sub> методом напыления. Площадь зоны контакта составила 7.5·10<sup>-4</sup> см<sup>2</sup>. Для формирования тыльного контакта на кремниевую пластину (100) был методом термического испарения нанесен алюминиевый слой (вакуумная установка для нанесения покрытий Hindhivas, модель 15F6). Электрические характеристики изделий были определены с помощью анализатора полупроводниковых приборов Agilent Technologies B1500A, который использовался для измерения ВАХ и ВФХ. Смещение напряжения было приложено к обратной стороне кремниевой подложки, в то время как верхний контакт имел нулевой потенциал. Положительная и отрицательная развертки смещения напряжения применялись через нулевое смещение. В данной работе представлено исследование *I-V* (вольт-амперных), *C-V* (вольт-фарадных) и *C<sup>-2</sup>-V* (петля гистерезиса) характеристик МОП-структуры (Pt/TiO<sub>2</sub>/Si) и оцениваются её электрические свойства.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Вольт-амперные характеристики

На рис. 1 показаны измеренные при прямом и обратном смещении характеристики напряжения в зависимости от плотности тока полученной МОП-структуры (Pt/TiO<sub>2</sub>/p-Si) конден-

сатора с использованием тонких пленок TiO<sub>2</sub>, которые осаждались при температуре 300 °С и отжигались при температурах: 400, 500 и 600 °С. Напряжение изменялось от -1 В до +1 В, полученные МОП-структуры демонстрируют выпрямляющие свойства. Коэффициент идеальности *n* (*I-V*) для МОП-конденсатора был получен по линейному участку зависимости ln(*I*) от напряжения с помощью уравнения [16], где *k* – постоянная Больцмана, *T* – температура и *q* – заряд электрона:

$$n = \frac{q}{kT} \left( \frac{dV}{d \ln I} \right). \tag{1}$$

Были рассчитаны различные электрические параметры, такие как коэффициент идеальности (*n*), высота барьера ( $\Phi_B$ ), ток насыщения (*I*<sub>0</sub>), ток утечки (*I*<sub>с</sub>) и последовательное сопротивление (*R*<sub>с</sub>), полученные значения приведены в табл. 1.

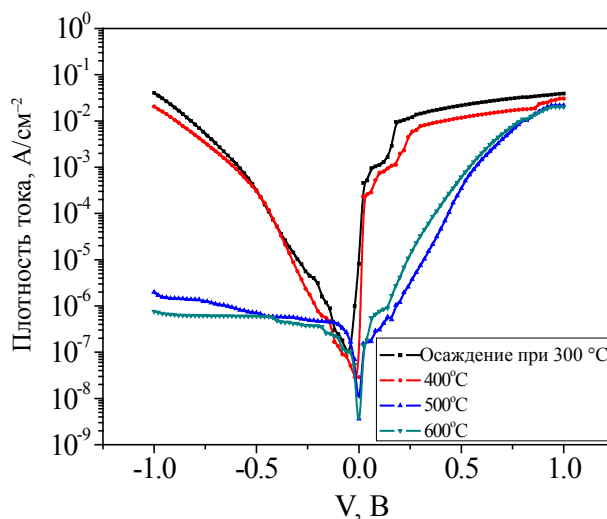


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики (*I-V*) Pt/TiO<sub>2</sub>/Si при осаждении и отжиге при различных температурах

Таблица 1. Электрические параметры структуры Pt/TiO<sub>2</sub>/Si (МОП) по данным ВАХ

Образец	Осаждение при 300 °С	Отжиг при 400 °С	Отжиг при 500 °С	Отжиг при 600 °С
$n_{(FB\ I-V)}$	3.014	2.78	2.64	2.24
$J_c, \text{A/cm}^2 \text{ при } 1 \text{ В}$	$1.19 \cdot 10^{-4}$	$9.14 \cdot 10^{-5}$	$7.4 \cdot 10^{-5}$	$4.2 \cdot 10^{-5}$
$\Phi_{B(FB\ I-V)}, \text{эВ}$	0.7004	0.7146	0.82879	0.840402
$I_0, \text{A}$	$5.89 \cdot 10^{-9}$	$1.02 \cdot 10^{-8}$	$7.15 \cdot 10^{-11}$	$4.56 \cdot 10^{-11}$
$n_{(dV/d \ln(I))}$	2.78	2.27	2.2	2.054
$\Phi_{B(H(I))}$	0.65	0.75	0.829	0.862
$R_{C(dV/d \ln(I))}, \Omega$	129.59	139.5	168.109	194.102
$R_{C(H(I))}, \Omega$	116.96	176.34	182.2	208,5

Можно отметить, что снижение коэффициента идеальности при увеличении температуры отжига может быть связано с падением потенциала на межфазном изолирующем слое TiO<sub>2</sub> на границе раздела металл/полупроводник. Значения тока насыщения были рассчитаны путем экстраполяции линейного участка на ось ординат, значения приведены в табл. 1. Высокое значение плотности тока утечки (при -1 В) уменьшается с увеличением температуры отжига, что может быть связано с методом синтеза и образованием дефектов на границе раздела кремний/TiO<sub>2</sub> и высоким последовательным сопротивлением осажденных тонких пленок TiO<sub>2</sub>, а также с тем, что верхний Pt электрод обладает более высокой проводимостью [17]. Высота барьера рассчитывается с помощью уравнения, где  $A^*$  – эффективная постоянная Ричардсона (32 А/см<sup>2</sup>·К<sup>2</sup>) для кремния *p*-типа,  $A$  – площадь устройства (1.96·10<sup>-3</sup> см<sup>2</sup>),  $T$  – комнатная температура (300 К),  $q$  – заряд электрона,  $k$  – постоянная Больцмана:

$$\Phi_{bo} = \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{AA^*T^2}{I_0} \right). \tag{2}$$

Расчетные значения приведены в табл. 1, из полученных данных следует, что высота барьера увеличивается с возрастанием температуры отжига. Это может быть связано с наличием иммобилизованных радикалов на границах раздела металл/изолирующий слой. Мы также провели дальнейший анализ методом Чонга с использованием функций, представленных в [18, 19]:

$$\frac{dV}{d \ln I} = IR_s + n \left( \frac{kT}{q} \right), \tag{3}$$

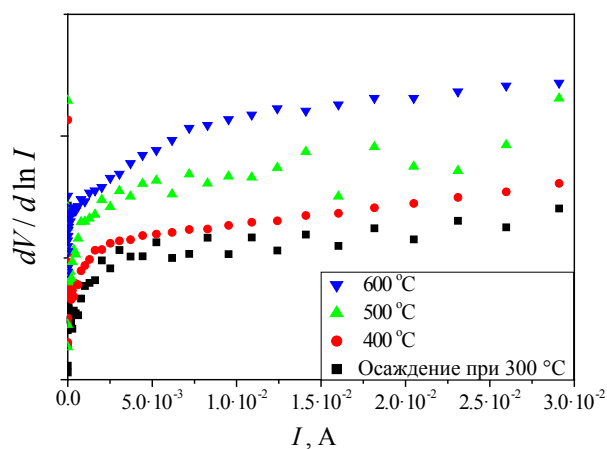


Рис. 2.  $dV/d \ln(I)$ - $I$  характеристики Pt/TiO<sub>2</sub>/Si при осаждении и отжиге при различных температурах

$$H(I) = n\Phi_B + IR_s = V - \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right). \tag{4}$$

На рис. 2 и 3 показаны графики зависимости  $dV/d \ln I$  от  $I$  и  $H(I)$  от  $I$ , соответствующие функциям Чонга приведенных выше уравнений, полученные из экспериментальных данных  $I$ - $V$  характеристик прямого тока. На рис. 2 полученный наклон характеризует последовательное сопротивление, а отрезок по оси  $y$  – коэффициент идеальности, который ближе к значениям, полученным из графика  $\ln(I)$ - $V$ . Последовательное сопротивление ( $R_s$ ) играет решающую роль в  $I$ - $V$  характеристиках МОП-структуры при высоком приложенном напряжении. Таким образом, рис. 3 также показывает отрезок прямой по оси тока, равный высоте барьера. Наклон данной прямой определяет последовательное сопротивление ( $R_s$ ), которое может быть использовано для проверки корректности данного подхода. Расчетные значения  $n$ ,  $\Phi_B$  и ( $R_s$ ) из функций Чонга, приведенные в табл. 1, близки к значениям, полученным на основе графика вольт-амперных ( $I$ - $V$ ) характеристик при прямом токе. Было обнаружено, что последовательное сопротивление ( $R_s$ ) увеличивается с увеличением температуры, что может быть связано с увеличением эффективной толщины оксидной пленки TiO<sub>2</sub> при увеличении температуры отжига.

### 3.1. Вольт-фарадные характеристики

На рис. 4 представлены вольт-фарадные ( $C$ - $V$ ) характеристики МОП-структуры (Pt/TiO<sub>2</sub>/Si) при напряжении от -1 В до +1 В на частоте 1 МГц и

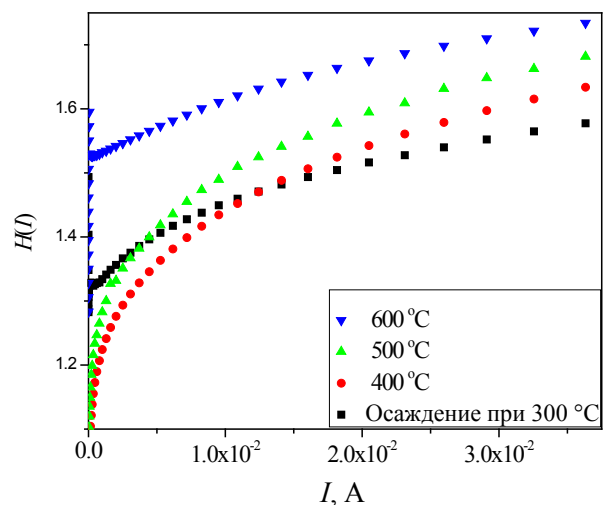
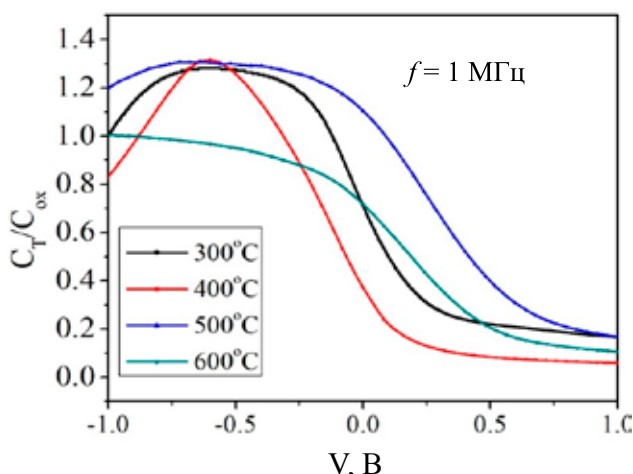


Рис. 3.  $H(I)$ - $I$  характеристики Pt/TiO<sub>2</sub>/Si при осаждении и отжиге при различных температурах



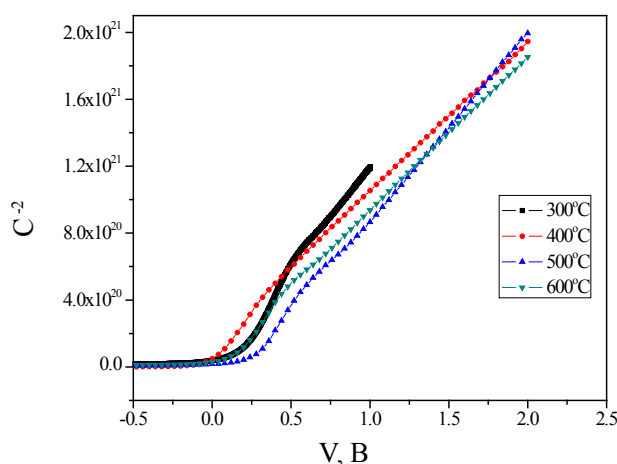


**Рис. 4.** Вольт-фарадные характеристики ( $C-V$ ) Pt/TiO<sub>2</sub>/Si при осаждении и отжиге при различных температурах

показаны области накопления, инверсии и обеднения. Выявлено интенсивное накопление с высоким показателем емкости образца при температуре обработки 600 °С, что объясняется изменением плотности состояний границ раздела и свободных связей, относящихся к границам раздела кремний/оксид и металл/оксид. Емкость увеличивается и уменьшается в области инверсии и накопления соответственно по мере увеличения напряжения на затворе, что объясняется увеличением тока утечки на границе TiO<sub>2</sub>/Si. Значение наклона, полученное из графика  $C^{-2}-V$  (рис. 5), было подставлено в приведенное ниже уравнение, и была определена концентрация заряда в оксиде, указанная в табл. 2:

$$\left(\frac{dC^{-2}}{dV}\right) = \left(\frac{2}{\epsilon_s q A^2 N_D}\right), \quad (5)$$

где  $\epsilon_s$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника (кремния),  $\epsilon_s = 11.8\epsilon_0$  ( $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14}$  Ф/см),



**Рис. 5.**  $C^{-2}-V$  характеристики Pt/TiO<sub>2</sub>/Si при осаждении и отжиге при различных температурах

$A$  – площадь и  $q$  – заряд. Из графика  $C^{-2}-V$  видно, что отрезок на оси напряжения соответствует напряжению плоских зон, значение приведено в табл. 2. Повышение температуры пленок в воздушной среде способствует увеличению количества кислородных вакансий и плотности акцепторных ловушек, что приводит к смещению напряжения плоских зон в сторону положительных значений. Концентрация заряда в оксиде при 400 °С увеличивается с температурой отжига, что может быть связано с уменьшением заряда на границах раздела, как видно из табл. 2. Резкое изменение емкости ( $C_{ox}$ ) на единицу площади при 400 °С объясняется тем, что между границами раздела кремний/оксид происходит случайное изменение концентрации примесей. Кроме того, при этой температуре нейтрализуется наибольшая плотность поверхностных ловушек. Аналогичное исследование МОП по графику  $C-V$  представлено в работах [20, 21]. Петля гистерезиса «против часовой стрелки»

**Таблица 2.** Электрические параметры структуры Pt/TiO<sub>2</sub>/Si (МОП) по данным ВФХ

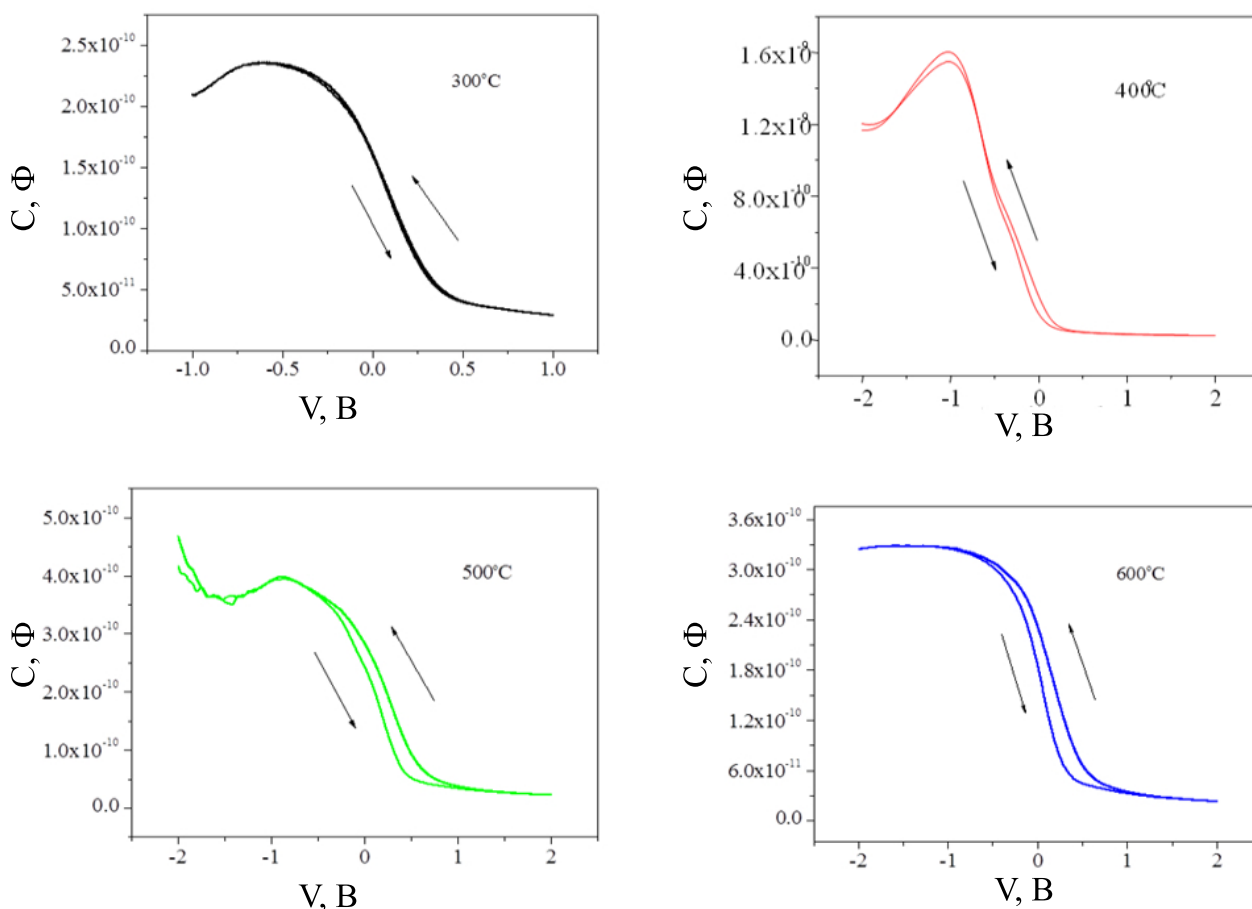
Образец	Осаждение при 300 °С	Отжиг при 400 °С	Отжиг при 500 °С	Отжиг при 600 °С
$C_{ox} \cdot 10^{-7}, \text{Ф/см}^2$	1.195	8.16	2.05	1.68
$V_{FB}, \text{В}$	-0.0705	-0.2148	-0.225	0.00992
$\nabla V_{FB}, \text{В}$	0.0466	0.07372	0.13766	0.0089
$\Delta C (\text{Ф})$	$2.23 \cdot 10^{-9}$	$4.19 \cdot 10^{-9}$	$1.01 \cdot 10^{-8}$	$1.01 \cdot 10^{-12}$
$D_{it}, \text{см}^{-1}\text{эВ}^{-1}$	$1.36 \cdot 10^{10}$	$2.54 \cdot 10^{10}$	$6.30 \cdot 10^{10}$	$6.3 \cdot 10^6$
$N_{eff}, \text{см}^{-3}$	$8.02 \cdot 10^{11}$	$6.07 \cdot 10^{12}$	$1.23 \cdot 10^{12}$	$1.19 \cdot 10^{12}$
$Q_{OT}, \text{Ф/см}^2$	$3.71 \cdot 10^{11}$	$1.76 \cdot 10^{11}$	$3.46 \cdot 10^{10}$	$9.37 \cdot 10^9$
$N_{ox}, \text{см}^{-3}$	$2.34 \cdot 10^{15}$	$2.85 \cdot 10^{15}$	$3.15 \cdot 10^{15}$	$3.32 \cdot 10^{15}$

ВФХ МОП-структуры при частоте 1 МГц для различных температур отжига показана на рис. 6. Напряжение постоянного тока меняется достаточно медленно, из-за чего инверсионный заряд успевает сформироваться, но частота переменного тока слишком высока, чтобы инверсионный заряд успел отреагировать, поэтому наблюдается высокочастотная кривая. Установлено, что форма петли гистерезиса улучшается при всех режимах смещения накопления, обеднения и инверсии в зависимости от термообработки, что может быть связано с уменьшением тока утечки и снижением плотности поверхностных ловушек. При гистерезисе вольт-фарадных характеристик развертка напряжения в направлении против часовой стрелки (от -1 В до +1 В и -1 В) не повторяет путь по часовой стрелке и смещается в сторону более низких значений напряжения из-за эффективной плотности заряда на границе раздела металл/кремний. Значительная петля гистерезиса наблюдалась при температуре отжига 600 °С, что может быть связано с

уменьшением поверхностного захваченного заряда, т. е.  $6.3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1} \text{ эВ}^{-1}$ , и уменьшением количества свободных связей [22, 23]. Поверхностная плотность ловушек определяется как свободные связи на поверхности полупроводника, отвечающие за уровень распределенной энергии, называемые поверхностными состояниями или поверхностной плотностью состояний в пределах запрещенной зоны на поверхности полупроводника ( $D_{it}$ ). Она рассчитывается с использованием ВФХ из следующей зависимости [24]:

$$D_{it} = \frac{dC}{q} \left( 1 - \frac{C_{HF} + \Delta C}{C_{ox}} \right) \left( 1 - \frac{C_{HF}}{C_{ox}} \right), \quad (6)$$

где  $\Delta C = C_{HF} - C_{LF}$ ,  $C_{LF}$  и  $C_{HF}$  – это область низких частот (менее 1 КГц) и область высоких частот (более 1 МГц) соответственно,  $C_{ox}$  – емкость на единицу площади, а  $q$  – заряд ( $1.69 \cdot 10^{-19}$  Кл). Значения поверхностной плотности ловушек  $D_{it}$  приведены в табл. 2. Обнаружено, что значения поверхностной плотности ловушек были ниже



**Рис. 6.** Петля гистерезиса вольт-фарадных характеристик (C-V) Pt/TiO<sub>2</sub>/Si при осаждении и отжиге при различных температурах

по сравнению с SiO<sub>2</sub>. Во время отжига тонкие пленки TiO<sub>2</sub> окисляются, что приводит к изменению свободных связей. Также отмечено, что при отжиге при 600 °С поверхностная плотность ловушек тонких пленок TiO<sub>2</sub> резко уменьшилась на четыре порядка (6.3·10<sup>6</sup> см<sup>-1</sup>эВ<sup>-1</sup>) по сравнению с пленками, обработанными при более низкой температуре. Это может быть связано с увеличением степени кристаллизации тонких пленок TiO<sub>2</sub> и уменьшением тока утечки (4.2·10<sup>-5</sup> А). Эффективная плотность заряда, ( $N_{\text{eff}}$ ), связана со связанным зарядом в оксиде ( $Q_f$ ), подвижным зарядом ( $Q_M$ ) и захваченным зарядом в оксиде ( $Q_{\text{от}}$ ), как показано в уравнении:

$$N_{\text{eff}} = \frac{Q_f + Q_M + Q_{\text{от}}}{q} \quad (7)$$

Для расчета эффективной плотности заряда оксида использовалось выражение Николлиана и Брюса [25]. Установлено, что  $N_{\text{eff}}$  связана с переходом металл (платина) – полупроводник и напряжением плоских зон следующим образом:

$$N_{\text{eff}} = \frac{C_{\text{ок}}(\varphi_{\text{MS}} - V_{\text{FB}})}{Aq}, \quad (8)$$

где  $A$  – площадь,  $C_{\text{ок}}$  – емкость на единицу площади,  $q$  – заряд электрона (1.69·10<sup>-19</sup> Кл),  $V_{\text{FB}}$  – напряжение плоских зон, и  $\varphi_{\text{MS}}$  – контактная разность потенциалов металл - полупроводник. Расчетные значения  $N_{\text{eff}}$  приведены в табл. 2. Обнаружено, что они уменьшаются с повышением температуры отжига, что объясняется увеличением тока утечки при электрическом напряжении. Это говорит о том, что поверхностные состояния создают нейтральные захваченные заряды в изоляционном слое. Захваченные заряды в оксиде расположены не на границе раздела кремний/оксид, а распределены по всему оксиду. Для правильной интерпретации кривых  $C$ - $V$  необходимо знать распределение  $Q_{\text{от}}$ . Они не вводятся во время изготовления образца, но в вольт-фарадных характеристиках во время развертки напряжения на затворе электроны или дырки могут инжектироваться со стороны затвора или подложки. Распределение захваченного заряда в оксиде определено с помощью уравнения [26]:

$$Q_{\text{от}} = \left( \frac{C_{\text{ок}} \nabla V_{\text{FB}}}{q} \right), \quad (9)$$

где  $\nabla V_{\text{FB}}$  – сдвиги напряжения плоских зон,  $C_{\text{ок}}$  – емкость на единицу площади и  $q$  – заряд

(1.69·10<sup>-19</sup> Кл). Значение  $Q_{\text{от}}$  приведено в табл. 2. Обнаружено, что данные значения уменьшаются с увеличением температуры термообработки, что может быть связано с ионизирующим излучением, лавинной инжекцией, эмиссией Шоттки, туннелированием по Фаулеру–Нордхайму или другими механизмами.

#### 4. Заключение

Установлено, что межфазный слой оказывает определяющее влияние на электрические свойства МОП-структур Pt/TiO<sub>2</sub>/Si. Параметры, рассчитанные по вольт-амперным характеристикам, такие как коэффициент идеальности ( $n$ ) и высота барьера ( $\Phi_b$ ), оказались сопоставимы с данными, полученными из модели на основе функций Чонга. Расчетные значения высоты барьера увеличиваются с ростом температуры отжига, что может быть связано с падением потенциала на поверхностном изолирующем слое TiO<sub>2</sub> на границе металл/полупроводник. Выявлено, что последовательное сопротивление ( $R_s$ ) системы увеличивается с повышением температуры термообработки. Наблюдаемое уменьшение тока утечки при увеличении температуры отжига объясняется уменьшением количества свободных связей. На основе вольт-фарадных характеристик были определены следующие параметры: концентрация заряда в оксиде ( $N_{\text{ок}}$ ), напряжение плоских зон ( $V_{\text{FB}}$ ), плотность поверхностных ловушек ( $D_{\text{it}}$ ), эффективная концентрация носителей заряда ( $N_{\text{eff}}$ ). Было обнаружено, что данные значения уменьшаются с увеличением температуры отжига из-за восстановления и перегруппировки атомов Ti и O. По петле гистерезиса ВФХ в направлении против часовой стрелки видно, что гистерезис смещается к более низким значениям напряжения из-за эффективной плотности заряда, присутствующей в МОП-структуре. Пленка TiO<sub>2</sub>, прошедшая отжиг при более высокой температуре, отличается областью более интенсивного накопления, что может быть связано с уменьшением плотности захваченного заряда на границе раздела и плотности захваченного оксидом заряда.

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных

отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

### Список литературы

1. Nakaruk A., Ragazzon D., Sorrel C. C. Anatase–rutile transformation through high-temperature annealing of titania films produced by ultrasonic spray pyrolysis. *Thin Solid Films*. 2010;518(14): 3735–3742. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.10.109>
2. Li W., Ni C., Lin H., Huang C. P., Ismat Shah S. Size dependence of thermal stability of TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Journal of Applied Physics*. 2004;96(11): 6663–6668. <https://doi.org/10.1063/1.1807520>
3. Murad E. Raman and X-ray diffraction data on anatase in fired kaolins. *Clays and Clay Minerals*. 2003;51(6): 689–692. <https://doi.org/10.1346/cmn.203.0510611>
4. Rausch N., Burte E. P. Thin TiO<sub>2</sub> films prepared by low pressure chemical vapor deposition. *Journal of The Electrochemical Society*. 1993;140(1): 145–149. <https://doi.org/10.1149/1.2056076>
5. Kemell M., Pore V., Ritala M., Leskelä M., Lindén M. Atomic layer deposition in nanometer-level replication of cellulosic substances and preparation of photocatalytic TiO<sub>2</sub>/cellulose composites. *Journal of the American Chemical Society*. 2005;127(41): 14178–14179. <https://doi.org/10.1021/ja0532887>
6. Kim D. J., Hahn S. H., Oh S. H., Kim E. J. Influence of calcination temperature on structural and optical properties of TiO<sub>2</sub> thin films prepared by sol–gel dip coating. *Materials Letters*. 2002;57(2): 355–360. [https://doi.org/10.1016/s0167-577x\(02\)00790-5](https://doi.org/10.1016/s0167-577x(02)00790-5)
7. Suda Y., Kawasaki H., Ueda T., Ohshima T. Preparation of high quality nitrogen doped TiO<sub>2</sub> thin film as a photocatalyst using a pulsed laser deposition method. *Thin Solid Films*. 2004;453–454: 162–166. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2003.11.185>
8. Wang H., Chen L., Wang J., Sun Q., Zhao Y. A micro oxygen sensor based on a nano sol-gel TiO<sub>2</sub> thin film. *Sensors*. 2014;14(9): 16423–16433. <https://doi.org/10.3390/s140916423>
9. Kikuchi H., Kitano M., Takeuchi M., Matsuoka M., Anpo M., Kamat P. V. Extending the photoresponse of TiO<sub>2</sub> to the visible light region: photoelectrochemical behavior of TiO<sub>2</sub> thin films prepared by the radio frequency magnetron sputtering deposition method. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2006;110(11): 5537–5541. <https://doi.org/10.1021/jp058262g>
10. Chandrashekhara H. D., Angadi B., Shashidhar R., Murthy L. C. S., Poornima P. Optical properties of pseudo binary oxides (TiO<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>-(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>x</sub> thin films prepared by spray pyrolysis technique. *Materials Today: Proceedings*. 2006;3(6): 2027–2034. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.105>
11. Khan M. I., Imran S., Shah Nawaz Saleem M., Ur Rehman S. Annealing effect on the structural, morphological and electrical properties of TiO<sub>2</sub>/ZnO bilayer thin films. *Results in Physics*. 2018;8: 249–252. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.12.030>
12. Ramana C., Becker U., Shutthanandan V., Julien C. Oxidation and metal-insertion in molybdenite surfaces: evaluation of charge-transfer mechanisms and dynamics. *Geochemical Transactions*. 2008;9(1). <https://doi.org/10.1186/1467-4866-9-8>
13. Chandrashekhara H. D., Angadi B., Shashidhar R., Murthy L. C. S., Poornima P. (2016). Isochronal effect of optical studies of TiO<sub>2</sub> thin films deposited by spray pyrolysis technique. *Advanced Science Letters*. 2016; 22(4): 739–744. <https://doi.org/10.1166/asl.2016.6975>
14. Kumar A., Sharma K. K., Chand S., Kumar A. Investigation of barrier inhomogeneities in I-V and C-V characteristics of Ni/n-TiO<sub>2</sub>/p-Si/Al heterostructure in wide temperature range. *Superlattices and Microstructures*. 2018;122: 304–315. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.07.034>
15. Kern W. *Hand book of semiconductor cleaning technology*. Noyes Publications; 1993. 623 p.
16. Sze S. M. *Physics of semiconductor devices*. New York: John Wiley and Sons; 1981. 868 p.
17. Gümüş A., Türüt A., Yalçın N. Temperature dependent barrier characteristics of CrNiCo alloy Schottky contacts on n-type molecular-beam epitaxy GaAs. *Journal of Applied Physics*. 2002;91(1): 245–250. <https://doi.org/10.1063/1.1424054>
18. Pakma O., Serin N., Serin T., Altındal Ş. The effects of preparation temperature on the main electrical parameters of Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) structures by using sol–gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2009;50(1): 28–34. <https://doi.org/10.1007/s10971-009-1895-4>
19. Yen C.-F., Lee M.-K. Low equivalent oxide thickness of TiO<sub>2</sub>/GaAs MOS capacitor. *Solid-State Electronics*. 2012;73: 56–59. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2012.03.007>
20. Rathee D., Kumar M., Arya S. K. (2012). Deposition of nanocrystalline thin TiO<sub>2</sub> films for MOS capacitors using Sol–Gel spin method with Pt and Al top electrodes. *Solid-State Electronics*. 2012;76: 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2012.04.041>
21. Wei D., Hossain T., Garces N. Y., ... Edgar J. H. Influence of atomic layer deposition temperatures on TiO<sub>2</sub>/n-Si MOS capacitor. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2013;2(5): N110–N114. <https://doi.org/10.1149/2.010305jss>
22. Chiu H.-C., Lin C.-K., Lin C.-W., Lai C.-S. Investigation of surface pretreatments on GaAs and memory characteristics of MOS capacitors embedded with Au nano-particles. *Microelectronics Reliability*. 2012;52(11): 2592–2596. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.05.002>
23. Murray H., Martin P. A unified channel charges expression for analytic MOSFET modeling. *Active and*



*Passive Electronic Components*. 2012; 1–12. <https://doi.org/10.1155/2012/652478>

24. Yen C.-F., Lee M.-K. Low equivalent oxide thickness of TiO<sub>2</sub>/GaAs MOS capacitor. *Solid-State Electronics*. 2012;73: 56–59. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2012.03.007>

25 Nicollian E. H, Brews J. R. *MOS (Metal Oxide Semiconductor) physics and pechnology*. John Wiley & Sons; 1982. 928 p.

26. Schroder D. K. *Semiconductor material and device characterization*. John Wiley & Sons; 2006. 800 p.

### Информация об авторах

Х. Д. Чандрашекхара, кандидат наук, доцент, физический факультет, Государственный научный колледж, Хассан (Карнатака, Индия).

<https://orcid.org/0000-0001-9976-3128>  
chandruhdc@gmail.com

П. Пурнима, доцент, физический факультет, Государственный научный колледж, Хассан (Карнатака, Индия).

<https://orcid.org/0000-0001-7685-6778>  
poornimaputtegowda81@gmail.com

Поступила в редакцию 08.12.2022; одобрена после рецензирования 18.01.2023; принята к публикации 15.05.2023; опубликована онлайн 25.09.2023.

Перевод на русский язык Ананьевой Анастасии Николаевны