

УДК 538.958:535.8

## ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ С ПЛЕНКОЙ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

**В. В. Трегулов**, к.т.н., доцент кафедры ОиТФиМПФ РГУ имени С.А. Есенина, Рязань, Россия; orcid.org/0009-0001-1441-6918, e-mail: trww@yandex.ru

**Г. Н. Скопцова**, старший преподаватель, научный сотрудник кафедры ОиТФиМПФ РГУ имени С.А. Есенина, Рязань, Россия;

orcid.org/0009-0009-6224-7555, e-mail: Skorpcova\_galya@mail.ru

**Н. Б. Рыбин**, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-2000-0158, e-mail: nikolay.rybin@yandex.ru

**Н. В. Рыбина**, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-0377-5605, e-mail: pgnv@mail.ru

*Представлены результаты исследования влияния термического отжига полупроводниковой структуры с пленкой пористого кремния на особенности процессов переноса носителей заряда и концентрацию ловушек. Пленка пористого кремния выращивалась методом металл-стимулированного травления. Исследования проводились методами вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик. Показано, что при отжиге в диапазоне температур 700 – 900 °С в течение 10 мин концентрация ловушек снижается более чем на два порядка величины. С ростом температуры отжига ухудшаются выпрямительные свойства полупроводниковой структуры. Также в результате отжига возрастает влияние токов, ограниченных пространственным зарядом, на механизмы переноса носителей заряда.*

**Ключевые слова:** пористый кремний, металл–стимулированное травление, термический отжиг, вольт-амперные характеристики, вольт-фарадные характеристики, ловушки, перенос носителей заряда.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2023-84-215-224

### Введение

В настоящее время проявляется значительный интерес к исследованию возможностей применения пленок пористого кремния (por-Si) в различных областях микро- и нанoeлектроники. Одним из наиболее важных применений porSi является создание антиотражающих покрытий кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии, способствующих повышению их КПД [1]. Для этого направления актуально использование пленок por-Si, изготовленных методом металл-стимулированного травления. Данный метод обеспечивает наиболее низкую отражательную способность поверхности пленки por-Si [2]. Кроме этого, пленки por-Si, сформированные металл-стимулированным травлением, могут применяться для реализации эффекта усиления комбинационного рассеяния света, повышающего чувствительность молекулярного анализа, для изготовления высокоэффективных термопреобразователей и литий-ионных аккумуляторов [3-5]. Одним из наиболее эффективных и простых способов управления свойствами пленок por-Si является термический отжиг. В частности, в работе [6] показано, что термический отжиг при температурах 400 – 500 °С приводит к стабилизации спектров фотолюминесценции пленок por-Si. Отжиг в диапазоне температур 1000 – 1100 °С интенсифицирует окисление por-Si, что позволяет управлять его оптическими свойствами [7]. В работе [8] показано, что отжиг приводит к трансформации морфологии пленок por-Si. Следует отметить, что большинство публикаций посвящено исследованию влияния термического отжига на структурные и оптические свойства пленок por-Si. В то же

время проблеме исследования влияния отжига на электрофизические свойства пленок  $\text{por-Si}$ , изготовленных методом анодного электрохимического травления, уделяется мало внимания.

Целью данной работы является исследование влияния термического отжига полупроводниковой структуры с пленкой  $\text{por-Si}$ , выращенной методом металл-стимулированного травления, на механизмы переноса носителей заряда.

### Экспериментальная часть

#### Технология изготовления экспериментальных образцов

В качестве подложек использовались монокристаллические кремниевые пластины  $p$ -типа с удельным сопротивлением 1 Ом·см и ориентацией поверхности (100). Пленка  $\text{por-Si}$  изготавливалась методом двухэтапного металл-стимулированного травления. Сначала на поверхности кремниевой пластины осаждались частицы серебра из раствора:  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  (0,01 М),  $\text{HF}$  (46 %),  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  (92 %) с соотношением компонентов 1:0,1:0,3 в течение 30 с. Далее пластина погружалась в раствор:  $\text{H}_2\text{O}_2$  (1,24 М),  $\text{HF}$  (46 %),  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  (92 %) с соотношением компонентов 1:0,5:0,25 и выдерживалась 20 мин. После формирования пористой структуры образцы отмывались в дистиллированной воде и в концентрированной азотной кислоте для удаления серебряных частиц из пор.

Термический отжиг образцов производился в электрической печи в диапазоне температур ( $T$ ) 400 – 1100 °С в течение времени ( $t$ ) 10, 60 и 90 мин. Режимы отжига для исследованных в данной работе образцов представлены в таблице 1. После отжига образцы отмывались в  $\text{HF}$  для удаления с поверхности оксида кремния. В результате на поверхности формировалась пористая структура, пример изображения которой, полученный с помощью растрового силового микроскопа, представлен на рисунке 1.

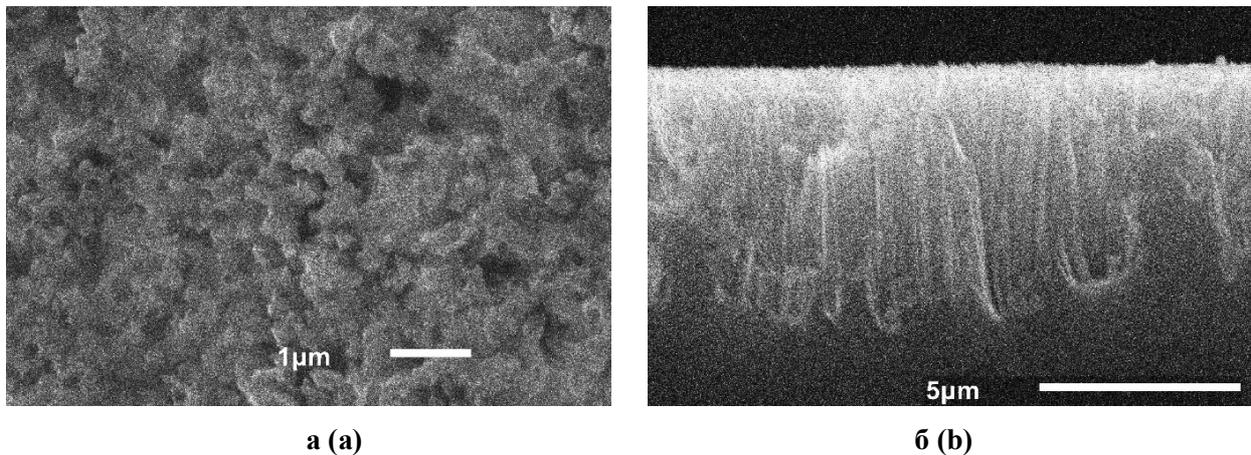


Рисунок 1 – Изображения фронтальной (а) и боковой (б) поверхности образца № 10  
Figure 1 – Images of frontal (a) and side (b) surface of sample № 10

Для проведения электрических измерений формировались индиевые омические контакты к пленке  $\text{por-Si}$  и кремниевой подложке на противоположных поверхностях полупроводниковой структуры. С целью выяснения механизмов переноса носителей заряда были исследованы вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики (ВАХ и ВФХ соответственно) при температуре 300 К. Измерения проводились с помощью цифрового измерителя иммитанса E7-20 (МНИПИ, р. Беларусь). Прямое смещение соответствует приложению отрицательного потенциала к контакту на поверхности слоя  $\text{por-Si}$ , положительного потенциала – к контакту на кремниевой подложке  $p$ -типа (на противоположной поверхности образца).

#### Исследование вольт-амперных характеристик

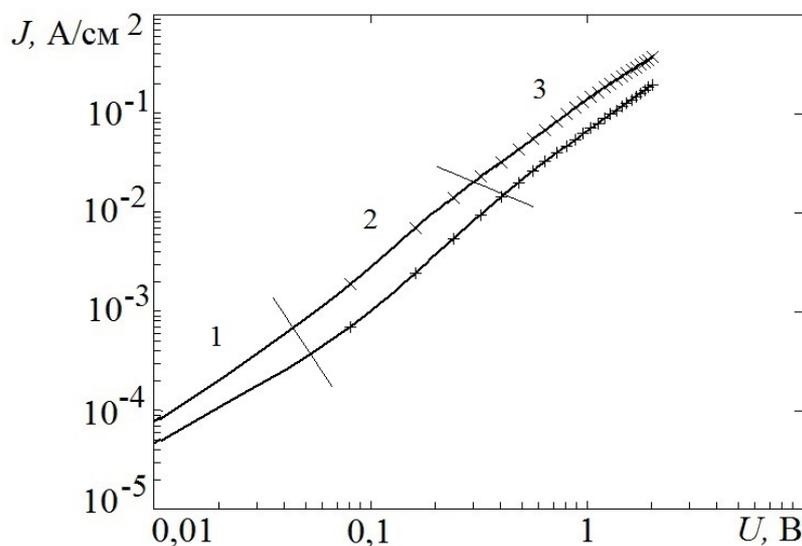
Вольт-амперные характеристики образцов заметно отличаются в зависимости от режимов отжига. В связи с этим исследуемые образцы были разделены на две группы. К первой

группе относятся образцы № 1 – № 3 (таблица 1), их ВАХ для прямого и обратного смещения представлены на рисунках 2 и 3, соответственно в виде зависимостей плотности тока  $J$  от напряжения постоянного смещения  $U$ . Для прямого смещения ВАХ представлены в двойном логарифмическом масштабе (рисунок 2), для обратного – в линейном (рисунок 3). В связи с тем, что для образцов № 1 и № 2 ВАХ практически не различаются, на рисунках 2 и 3 показаны характеристики образцов № 1 и № 3.

**Таблица 1 – Влияние режимов отжига экспериментальных образцов на величину коэффициента выпрямления  $K$  и концентрацию ловушек  $N_t$**

**Table 1 – Influence of annealing regimes of experimental samples on the value of rectification factor  $K$  and trap concentration  $N_t$**

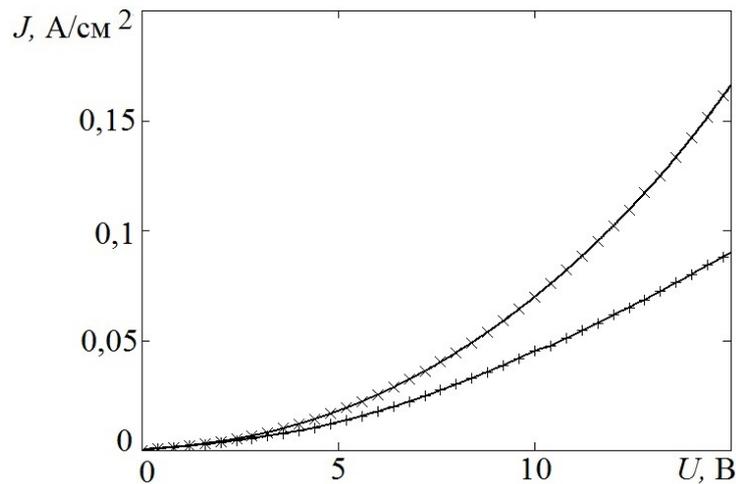
№ обр.	Режим отжига		$K$	$N_t, \text{см}^{-3}$
	$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{мин}$		
1	без отжига		74,9	$5,9 \cdot 10^{16}$
2	400	10	74,1	$1,4 \cdot 10^{16}$
3	500	10	38,8	$3,9 \cdot 10^{15}$
4	600	10	3,4	$7,9 \cdot 10^{14}$
5	700	10	2,3	$4,0 \cdot 10^{14}$
6	900	10	1,2	$4,2 \cdot 10^{14}$
7	1000	10	1,2	$5,1 \cdot 10^{14}$
8	1100	10	1,2	$6,0 \cdot 10^{14}$
9	1000	60	1,2	$7,2 \cdot 10^{14}$
10	1000	90	1,2	$8,1 \cdot 10^{14}$



**Рисунок 2 – Прямые ветви ВАХ для образцов первой группы:  
× – № 1, + – № 3 в двойном логарифмическом масштабе**

**Figure 2 – Direct branches of CVC for samples of the first group:  
× – No. 1, + – No. 3 in a double logarithmic scale**

Из рисунков 2 и 3 видно, что ВАХ образцов № 1 – № 3 имеют выпрямляющий характер. Величина коэффициента выпрямления ( $K$ ), определенная как отношение плотностей токов при  $U = 1,0$  В для прямого и обратного смещения, для образцов № 1 – № 3 снижается в пределах 74,9 – 38,8 соответственно. Для всех исследованных образцов значение величины  $K$  указано в таблице 1.



**Рисунок 3 – Обратные ветви ВАХ для образцов первой группы: × – № 1, + – № 3 в линейном масштабе**

**Figure 3 – Reverse branches of CVC for samples of the first group: × – No. 1, + – No. 3 on a linear scale**

При прямом смещении на ветвях ВАХ (рисунок 2) можно выделить 3 участка, которые приблизительно аппроксимируются отрезками прямых, что свидетельствует о проявлении нескольких механизмов переноса носителей заряда. Участок 1 на рисунке 2 описывается экспоненциальной зависимостью, характерной для барьерных структур:

$$J \propto \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right), \quad (1)$$

где  $q$  – элементарный заряд;  $n$  – показатель неидеальности;  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура [9, 10]. Так как для образцов № 1 – № 3  $n \approx 2$ , то на данном участке прямых ветвей ВАХ ток определяется рекомбинацией носителей в области пространственного заряда (ОПЗ) с участием ловушек.

Участки 2 и 3 прямых ветвей ВАХ (рисунок 2) объясняются в рамках теории токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ), для которой характерна зависимость

$$J \propto U^m, \quad (2)$$

где  $m$  – показатель степени, характеризующий наклон соответствующего участка ВАХ [10]. На участке 2 прямых ветвей ВАХ образцов № 1 – № 3 (рисунок 2)  $m=2$ , что в рамках теории ТОПЗ соответствует квадратичному ловушечному закону и характеризует влияние моноэнергетического глубокого центра (ловушки) на перенос носителей заряда [11]. На участке 3 (рисунок 2) для указанных образцов выполняется условие  $1 < m < 2$ . В рамках теории ТОПЗ это объясняется тем, что концентрация инжектированных носителей заряда становится сравнимой с концентрацией термически генерированных носителей с ловушек [11].

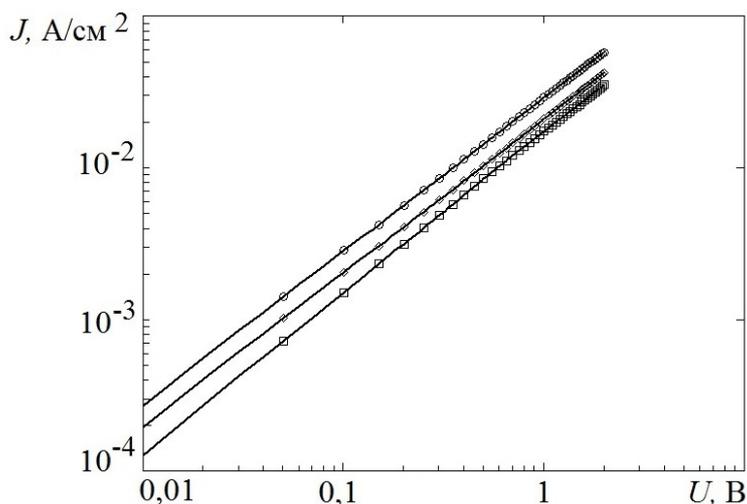
Обратные ветви ВАХ образцов № 1 – № 3 (рисунок 3) по качественному виду характерны для барьерных структур с так называемым «мягким» пробоем [12]. Согласно [12], это объясняется лавинным пробоем с участием ловушек, имеющих непрерывное распределение энергии активации.

Вторая группа состоит из образцов № 4 – № 10 (таблица 1). Так как ветви ВАХ указанных образцов имеют идентичный характер и расположены близко друг к другу, то на рисунках 4 и 5 представлены прямые и обратные ветви ВАХ, соответственно образцов № 4, № 8 и № 9. Также следует отметить, что ветви ВАХ образцов № 9 и № 10 практически совпадают.

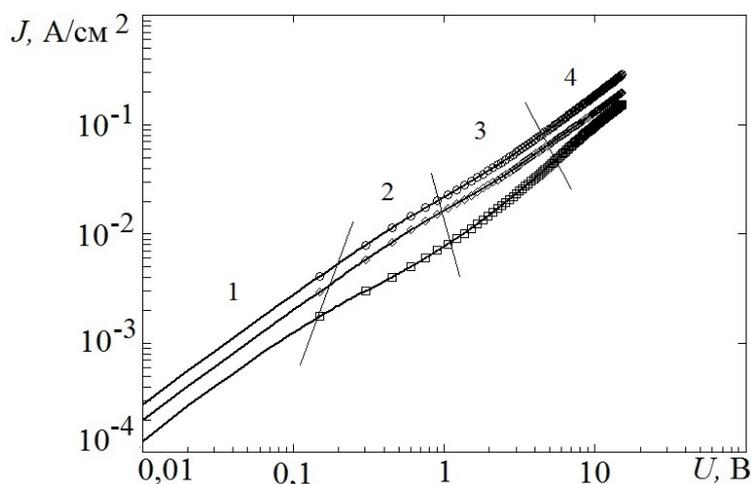
Прямые ветви ВАХ образцов второй группы (рисунок 4) описываются в рамках теории ТОПЗ выражением (2). Для всех образцов во всем диапазоне значений  $U$  они имеют постоянный наклон,  $m = 1,0$ . Согласно [11] это означает, что концентрация инжектированных носителей заряда в ОПЗ при данной температуре не превышает равновесной концентрации.

Величина коэффициента выпрямления  $K$  образцов второй группы значительно меньше, чем у первой группы (таблица 1).

На обратных ветвях ВАХ образцов второй группы (рисунок 5) можно выделить 4 участка, которые описываются выражением (2) в рамках теории ТОПЗ. На участках 1, 3, 4 для всех образцов выполняется условие  $1 < m < 2$ , согласно [11] здесь концентрация инжектированных носителей заряда становится сравнимой с концентрацией термически генерированных носителей с ловушек. На участке 2  $m = 1,0$ . Наблюдаемая ситуация может свидетельствовать о том, что при обратном смещении процессы переноса носителей заряда определяются влиянием нескольких групп ловушек с разными энергиями активации.



**Рисунок 4 – Прямые ветви ВАХ для образцов второй группы:**  
 □ – № 4, ◇ – № 8, ○ – № 9 в двойном логарифмическом масштабе  
**Figure 4 – Direct branches of CVC for samples of the second group:**  
 □ – No. 4, ◇ – No. 8, ○ – No. 9 in double logarithmic scale



**Рисунок 5 – Обратные ветви ВАХ для образцов второй группы:**  
 □ – №4, ◇ – №8, ○ – №9 в двойном логарифмическом масштабе  
**Figure 5 – Reverse branches of CVC for samples of the second group:**  
 □ – No. 4, ◇ – No. 8, ○ – No. 9 in double logarithmic scale

#### Исследование вольт-фарадных характеристик

С целью получения информации о ловушках проводилось измерение ВФХ на частоте 1 МГц при обратном смещении. Несмотря на то, что на высоких частотах заряд на ловушках не успевает следовать за измерительным сигналом, он оказывает влияние на ширину ОПЗ ( $W$ ) и значение высокочастотной емкости [13]. Для оценки влияния ловушек можно сравнивать ВФХ  $C_{IN}(U)$ , измеренные при прямом ходе развертки постоянного напряжения смеще-

ния от 0 до некоторого значения  $U_m$ , и ВФХ  $C_{OUT}(U)$ , измеренные при обратной развертке от  $U_m$  до 0. При отсутствии ловушек кривые  $C_{IN}(U)$  и  $C_{OUT}(U)$  должны полностью совпадать. При наличии ловушек наблюдается явление гистерезиса – кривые  $C_{IN}(U)$  и  $C_{OUT}(U)$  различаются [14]. Таким образом, анализируя полосу гистерезиса, образованную кривыми  $C_{IN}(U)$  и  $C_{OUT}(U)$ , можно получить информацию о ловушках, находящихся в ОПЗ [14].

Величина барьерной емкости определяется отношением приращения заряда в ОПЗ к величине изменения напряжения [9]:

$$C = \frac{dQ}{dU}. \quad (3)$$

Отсюда заряд  $Q$ , сосредоточенный в ОПЗ, при изменении напряжения постоянного смещения от  $U_1$  до  $U_2$  можно выразить следующим образом:

$$Q = \int_{U_1}^{U_2} C(U) dU. \quad (4)$$

С другой стороны, заряд  $Q$  определяется объемными концентрациями легирующей примеси  $N_b$  и ловушек  $N_t$ , а также толщиной ОПЗ  $W$ :

$$Q = q(N_b + N_t)WS, \quad (5)$$

где  $S$  – площадь образца.

Учитывая явление гистерезиса ВФХ, используя выражения (4) и (5), можно записать следующее выражение для концентрации ловушек:

$$N_t = \frac{1}{qS} \int_0^{U_m} \frac{|C_{IN}(U) - C_{OUT}(U)|}{|W_{IN}(U) - W_{OUT}(U)|} dU, \quad (6)$$

где  $W_{IN}(U)$  и  $W_{OUT}(U)$  – изменения толщины ОПЗ для прямой и обратной развертки постоянного напряжения смещения  $U$  соответственно.

В выражении (6) значения  $W_{IN}(U)$  и  $W_{OUT}(U)$  вычисляются по формулам:

$$W_{IN}(U) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{C_{IN}(U)}, \quad (7)$$

$$W_{OUT}(U) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{C_{OUT}(U)}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость кремния.

Для образцов №1 – №10 ВФХ  $C_{IN}(U)$  и  $C_{OUT}(U)$  измерялись в диапазоне значений  $U$  0 – 4 В. На рисунке 6 представлены ВФХ, типичные для образцов первой и второй группы.

Концентрации ловушек  $N_t$ , рассчитанные по формуле (6), представлены в таблице 1.

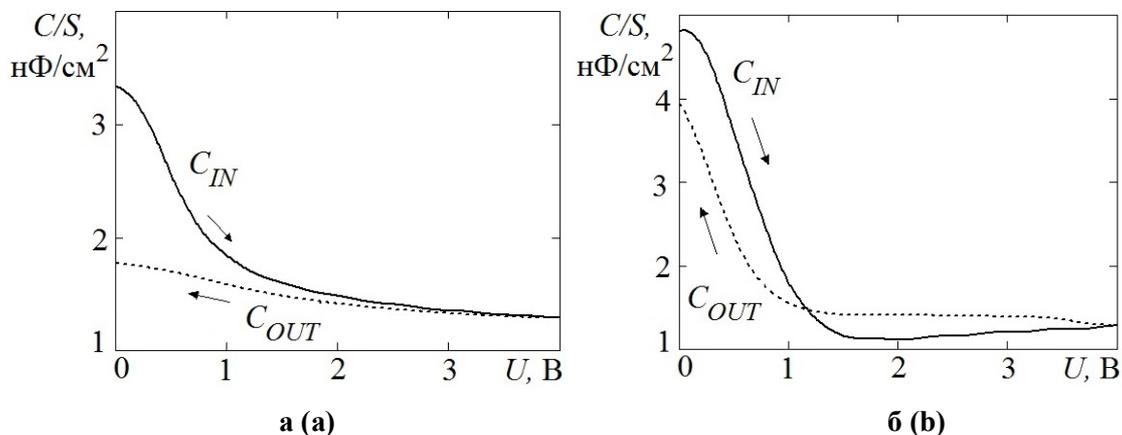


Рисунок 6 – Вольт-фарадные характеристики, типичные для образцов первой (а) и второй группы (б), стрелками показано направление развертки постоянного напряжения смещения  
Figure 6 – Capacitance-voltage characteristics typical of samples of the first (a) and second group (b), arrows show the direction of DC bias voltage sweep

### Обсуждение результатов эксперимента

Для объяснения процессов переноса носителей заряда в исследуемой полупроводниковой структуре можно предложить модель зонной диаграммы ее приповерхностной области для равновесного случая в виде рисунка 7. Область 1 на рисунке 7 характеризует поверхностный слой кремниевых кристаллитов пленки  $\text{por-Si}$ . Индиевый контакт к области 1 является невыпрямляющим (омическим). Пленка  $\text{por-Si}$  и кремниевая подложка имеют  $p$ -тип проводимости. Область 2 (рисунок 7) находится в глубине кремниевых кристаллитов пленки  $\text{por-Si}$ . Индиевые контакты к подложке и пленке  $\text{por-Si}$  являются омическими. Образцы первой группы обладают четко выраженными выпрямляющими свойствами (таблица 1). Также они характеризуются наиболее высокими значениями концентрации ловушек, причем для образцов № 1 и № 2 величина  $N_t$  превышает или сравнима с концентрацией акцепторной примеси в кремниевой подложке, которая составляет  $1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (таблица 1). В качестве ловушек могут выступать состояния  $E_{SS}$ , сосредоточенные в приповерхностной области (область 1 на рисунок 7) кремниевых кристаллитов. Область 1 может представлять собой частично компенсированный полупроводник. В результате на границе между областями 1 и 2 (рисунок 7) уровень Ферми  $E_F$  может быть зафиксирован со стороны области 1. Согласно [15] такая ситуация характерна для структур с высокой плотностью поверхностных состояний на границах раздела. Область пространственного заряда толщиной  $W$  находится в глубине кремниевых кристаллитов пленки  $\text{por-Si}$  (область 2 на рисунке 7). Направление изгиба зон в ОПЗ области 2, обусловлено эффектом выпрямления [11, 15]. Потенциальный барьер  $e\phi$ , определяемый изгибом зон в ОПЗ, обуславливает эффект выпрямления.

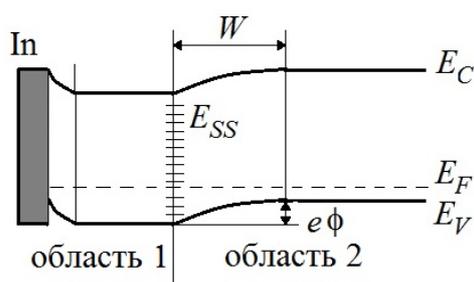


Рисунок 7 – Зонная диаграмма приповерхностной области исследуемой полупроводниковой структуры

Figure 7 – Band diagram of near-surface region of investigated semiconductor structure

Для образцов второй группы коэффициент выпрямления резко снижается, одновременно здесь наблюдается существенное снижение величины  $N_t$  по сравнению с образцами первой группы (таблица 1). Наиболее низкие значения  $N_t$  имеют образцы № 5 и № 6 с температурой отжига  $700 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$  (таблица 1). Наблюдаемое снижение концентрации ловушек может быть обусловлено частичным окислением поверхности кремниевых кристаллитов пленки  $\text{por-Si}$  с последующим удалением окисла травлением в  $\text{HF}$ . В то же время для образцов № 7 – № 10 наблюдается небольшой рост величины  $N_t$  по сравнению с образцами № 5 и № 6 (таблица 1). Это можно объяснить сложным характером трансформации дефектов в пленке  $\text{por-Si}$  под действием высоких температур.

В результате исследования ВАХ установлено, что процессы переноса носителей заряда имеют сложный характер. Для образцов первой группы при прямом смещении перенос носителей заряда определяется экспоненциальной зависимостью (1), характерной для барьерных структур, также проявляется механизм ТОПЗ. При обратном смещении электрический ток определяется лавинным пробоем с участием ловушек, имеющих непрерывное распределение энергии активации. Таким образом, на процессы переноса носителей заряда в образцах первой группы существенное влияние оказывают генерационно-рекомбинационные процессы с участием ловушек.

Для образцов второй группы при прямом и обратном смещении процессы переноса носителей определяются в рамках теории ТОПЗ. На прямых ветвях ВАХ экспоненциальный участок, описываемый выражением (1), не проявляется. Этим объясняются слабо выраженные выпрямительные свойства образцов второй группы. В целом процессы переноса носителей заряда в указанных образцах определяются влиянием нескольких групп ловушек с разными энергиями активации. Как видно из таблицы 1, образцы второй группы имеют существенно более низкие значения  $N_t$  по сравнению с образцами первой группы. Этим можно объяснить более низкие значения коэффициента выпрямления образцов второй группы. Благодаря низкой концентрации ловушек не происходит фиксации уровня Ферми на границе между областями 1 и 2 (рисунок 7). Малые значения коэффициента выпрямления образцов второй группы (таблица 1) могут быть обусловлены эффектами ТОПЗ.

### Заключение

Показано, что термический отжиг полупроводниковой структуры с пленкой пористого кремния, изготовленной металл-стимулированным травлением, снижает концентрацию ловушек. Наибольшее снижение концентрации ловушек, до  $(4,0 - 4,2) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (более чем на два порядка величины), происходит при отжиге в диапазоне температур 700 – 900 °С в течение 10 мин (таблица 1). Также отжиг приводит к ухудшению выпрямляющих свойств полупроводниковой структуры. Коэффициент выпрямления снижается с 74,9 (для образца без отжига) до 1,2 (таблица 1). Снижение коэффициента выпрямления может быть связано с уменьшением концентрации ловушек, вследствие чего не происходит фиксации уровня Ферми на границе области пространственного заряда в приповерхностной области.

Отжиг приводит к заметному изменению механизмов переноса носителей заряда. Так, в результате отжига при температурах 600 – 1100 °С на прямых ветвях ВАХ исчезает экспоненциальный участок, характерный для барьерных структур, и механизмы переноса носителей определяются исключительно эффектами ТОПЗ. Процессы переноса носителей заряда в образцах, исследованных в данной работе, определяются влиянием нескольких групп ловушек с разными энергиями активации.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) на оборудовании Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина.*

### Библиографический список

1. **Dzhafarov T., Bayramov A.** Porous Silicon and Solar Cells / Handbook of Porous Silicon, ed. by L. Canham (Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018) p. 1479- 1492.
2. **Madhavi Karanam, Mohan Rao G., Habibuddin Shaik, Padmasuvarna R.** Study of the Properties of the Porous Silicon Synthesized by Ag Assisted Electrolysis Etching. International Letters of Chemistry // Physics and Astronomy. 2016. Vol.71. P. 40-48.
3. Han H., Huang Z., Lee W. Metal-assisted chemical etching of silicon and nanotechnology applications // Nano Today, 2014, V. 9, No. 3, p.p. 271-304.
4. **Bandarenka H.V.** SERS Analysis with Porous Silicon / Handbook of Porous Silicon, ed. by L. Canham (Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018), p. 1315 - 1335.
5. **Zhao Y., Liu Z., Liang C., et al.** Structure and Electrochemical Properties of Hierarchically Porous Silicon Film Prepared with the Combination of Magnetron Sputtering Deposition and Metal-Assisted Chemical Etching // Int. J. Electrochem. Sci., 2017, No. 12, p.p. 8591-8598.
6. **Huajie Chen and Xiaoyuan Hou.** Passivation of porous silicon by wet thermal oxidation // Journal of Applied Physics. 1996. No 79. P. 3282.
7. **Korotchenkov G.** Porous Silicon from Formation to Application. V.1. Formation and Properties, edited by G. Korotchenkov, 2016. London, New York: CRC Press Taylor and Francis Group. 423 p.

8. Aggarwal G., Mishra P., Joshi B., et al. Porous silicon surface stability: a comparative study of thermal oxidation techniques // J. Porous Mater. 2014. No 21. P. 23-29.

9. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов: пер. с англ.; в 2 т. М.: Мир, 1984. Т.1. 456 с.

10. Семенов А. Р., Голованова М. В., Литвинов В. Г., Громов Д. Г., Олейник С. П., Холомина Т. А., Ермачихин А. В. Исследование механизмов переноса заряда в гетероструктурах Me/ZnO/Si // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. №. 70. С. 179-189.

11. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах (М.: Мир, 1973, 416 с.).

12. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы (М.: Высш. Шк., 1987, 479 с.).

13. Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука, 1981. 176 с.

14. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Сидоров Г. Ю., Варавин В. С. Определение спектров поверхностных состояний при значительном гистерезисе электрофизических характеристик МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. №12/2(60). С. 202–206.

15. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел / пер. с англ. Ф.Я. Надь, В.И. Сидорова. М.: изд-во «Иностранная литература». 1962. 558 с.

UDC 538.958:535.8

## THE EFFECT OF THERMAL ANNEALING OF SEMICONDUCTOR STRUCTURE WITH POROUS SILICON FILM ON MECHANISMS OF CARRIER TRANSFER

V. V. Tregulov, Ph.D. (Tech.), associate professor, Department of Physics, RSU named for S. Yesenin, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0001-1441-6918, e-mail: trww@yandex.ru

G. N. Skoptsova, senior lecturer, research assistant, Department of Physics, RSU named for S. Yesenin, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0009-6224-7555, e-mail: Skopcova\_galya@mail.ru

N. V. Rybina, Ph.D. (Phys. and Math.), associate professor, associate professor, Department of Micro- and Nanoelectronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-0377-5605, e-mail: pgnv@mail.ru

N. B. Rybin, Ph.D. (Phys. and Math.), associate professor, associate professor, Department of Micro- and Nanoelectronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-2000-0158, e-mail: nikolay.rybin@yandex.ru

*The results of studying the effect of thermal annealing of semiconductor structure with porous silicon film on the features of charge carrier transfer processes and trap concentration are presented. A porous silicon film was grown by metal-assisted etching. The studies were carried out by the methods of current-voltage and capacitance-voltage characteristics. Upon annealing in temperature range of 700 – 900 °C for 10 min, the concentration of traps is shown to decrease by more than two orders of magnitude. As annealing temperature increases, rectifying properties of semiconductor structure deteriorate. Also, as a result of annealing, the influence of currents limited by space charge on the mechanisms of charge carrier transport increases.*

**Keywords:** porous silicon, metal-assisted etching, thermal annealing, current-voltage characteristics, capacitance-voltage characteristics, traps, charge carrier transfer.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2023-84-215-224

### References

1. Dzhafarov T., Bayramov A. *Porous Silicon and Solar Cells / Handbook of Porous Silicon*, ed. by L. Canham (Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018) pp. 1479-1492.

2. **Madhavi Karanam, Mohan Rao G., Habibuddin Shaik, Padmasuvarna R.** Study of the Properties of the Porous Silicon Synthesized by Ag Assisted Electrolysis Etching. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*. 2016, vol.71, pp. 40-48.
3. **Han H., Huang Z., Lee W.** Metal-assisted chemical etching of silicon and nanotechnology applications. *Nano Today*. 2014, vol. 9, no. 3, pp. 271-304.
4. **Bandarenka H.V.** *SERS Analysis with Porous Silicon / Handbook of Porous Silicon*, ed. by L. Canham (Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018), pp. 1315 - 1335.
5. **Zhao Y., Liu Z., Liang C., et al.** Structure and Electrochemical Properties of Hierarchically Porous Silicon Film Prepared with the Combination of Magnetron Sputtering Deposition and Metal-Assisted Chemical Etching. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2017, no. 12, pp. 8591-8598.
6. **Huajie Chen and Xiaoyuan Hou.** Passivation of porous silicon by wet thermal oxidation. *Journal of Applied Physics*. 1996, no. 79, pp. 3282.
7. **Korotchenkov G.** *Porous Silicon from Formation to Application. V.1. Formation and Properties*, edited by G. Korotchenkov, 2016. London, New York: CRC Press Taylor and Francis Group. 423 p.
8. **Aggarwal G., Mishra P., Joshi B., et al.** Porous silicon surface stability: a comparative study of thermal oxidation techniques. *J. Porous Mater.* 2014, no. 21, pp. 23-29.
9. **Zi S.M.** *Fizika poluprovodnikovyh priborov: per. s angl. Vol.1.* Moscow: Mir, 1984. 456 p. (in Russian).
10. **Semenov A. R., Golovanova M. V., Litvinov V. G., Gromov D. G., Olejnik S. P., Holomina T. A., Ermachihin A. V.** Issledovanie mehanizmov perenosa zarjada v geterostrukturah Me/ZnO/Si. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2019, no. 70, pp. 179-189. (in Russian).
11. **Lampert M., Mark P.** *Inzhekcionnye toki v tverdyh telah.* Moscow: Mir. 1973, 416 p. (in Russian).
12. **Pasynkov V. V., Chirkin L. K.** *Poluprovodnikovye pribory.* Moscow: Vyssh. Shk. 1987, 479 p. (in Russian).
13. **Berman L. S., Lebedev A. A.** *Emkostnaja spektroskopija glubokih centrov v poluprovodnikah.* Leningrad: Nauka. 1981, 176 p. (in Russian).
14. **Vojcehovskij A. V., Nesmelov S. N., Dzijaduh S. M., Sidorov G. Ju., Varavin V. S.** Opredelenie spektrov poverhnostnyh sostojanij pri znachitel'nom gisterezise jelektrofizicheskikh harakteristik MDP-struktur na osnove MLJe HgCdTe. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*. 2017, no. 12/2(60), pp. 202-206. (in Russian).
15. **B'jub R.** *Fotoprovodimost' tverdyh tel / per. s angl. F.YA. Nad', V.I. Sidorova.* Moscow: izd-vo «Inostrannaya literatura». 1962, 558 p. (in Russian).