

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 538.958:535.8

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ С ПЛЕНКОЙ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ОБЛУЧЕННОЙ НАНОСЕКУНДНЫМ ИТТЕРБИЕВЫМ ЛАЗЕРОМ

В. С. Хилов, аспирант кафедры ОиТФиМПФ РГУ имени С.А. Есенина, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0002-1673-8029, e-mail: laservr@yandex.ru

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

А. И. Иванов, аспирант кафедры ОиТФиМПФ РГУ имени С.А. Есенина, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0002-7637-1433, e-mail: alex2012-14@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

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

Исследовано влияние параметров режима облучения наносекундными лазерными импульсами иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1064 нм на динамику изменения концентрации дефектов с глубокими энергетическими уровнями. Показано, что облучение пленки por-Si полупроводниковой структуры por-Si/p-Si при длительности импульса 4 нс и средней энергии импульса $3,60 \cdot 10^9$ Дж приводит к снижению концентрации дефектов с глубокими энергетическими уровнями почти на два порядка величины. Дальнейшее увеличение длительности импульса и его средней энергии приводит к росту концентрации дефектов. Облучение лазером приводит к плавлению поверхностного слоя пленки por-Si. Установлены механизмы процессов, управляющие изменением концентрации дефектов с глубокими энергетическими уровнями. Показано, что электрофизические характеристики исследуемой полупроводниковой структуры por-Si/p-Si в значительной мере определяются ловушками с энергетическими уровнями, характеризующимися сложным распределением в области энергий активации.

Ключевые слова: пористый кремний, наносекундные лазерные импульсы, вольт-амперные характеристики, вольт-фарадные характеристики, глубокие энергетические уровни, генерационно-рекомбинационные процессы.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-256-266

Введение

В настоящее время актуальна задача применения пленок пористого кремния (por-Si) для создания полупроводниковых приборов. Одним из важнейших свойств por-Si является сильно развитая поверхность, что делает его привлекательным для создания антиотражающих слоев солнечных элементов, чувствительных областей датчиков влажности и химических газовых датчиков [1]. Также важно отметить, что для формирования por-Si не требуются сложное технологическое оборудование и дорогие химические реактивы. Для повышения эффективности солнечных элементов, улучшения функциональных характеристик датчиков актуальна задача разработки новых способов модификации поверхности por-Si. Одним из вариантов решения указанной задачи является обработка пленок por-Si наносекундными лазерными импульсами [2-4]. В частности, наносекундные лазерные импульсы длительностью 70 нс при длине волны 694 нм, в диапазоне плотностей энергии 0,73-1,8 Дж/см² существенно

изменяют морфологию пленок por-Si [2]. В работе [3] показано, что облучение лазером с длительностью импульсов 80-100 нс в диапазоне плотности энергии 5-7 Дж/см² приводит к окислению por-Si . В работе [4] изучалось воздействие на поверхность por-Si импульсного иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1064 нм, при длительностях импульса 4-30 нс и мощности 4-12 Вт. В результате исследований показано, что режимы облучения влияют на информационно-корреляционные характеристики поверхности por-Si .

Целью данной работы является исследование влияния режимов облучения наносекундными лазерными импульсами пленок por-Si , сформированных методом металл-стимулированного травления, на электрофизические характеристики полупроводниковой структуры por-Si/p-Si .

Технология изготовления образцов

Для изготовления исследуемых образцов применялись кремниевые монокристаллические пластины p -типа проводимости, с удельным сопротивлением 1 Ом·см и ориентацией поверхности (100). Пленки por-Si выращивались методом двухэтапного металл-стимулированного травления.

В ходе первого этапа на поверхности кремниевой пластины осаждались частицы серебра из раствора: Ag_2SO_4 (0,01 М), HF (46 %), $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (92 %) при соотношении компонентов 1:0, 1:0,3, в течение 20 с. Затем пластина отмывалась в дистиллированной воде.

На втором этапе пластина с частицами серебра погружалась в раствор: H_2O_2 (1,24 М), HF (46 %), $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (92 %) при соотношении компонентов 1:0, 5:0,25 и выдерживалась в течение 60 мин. В результате формировалась пористая структура. Далее образцы отмывались в дистиллированной воде, а затем в концентрированной HNO_3 в течение 60 мин для удаления из пор серебряных частиц. В заключение образцы промывались дистиллированной водой для удаления следов реактивов и продуктов реакции и высушивались в сушильном шкафу.

Облучение пленок por-Si проводилось импульсным иттербиевым волоконным лазером YLPM-1-4x200-20-20 (IPG Photonics, Россия) с длиной волны излучения 1064 нм. Лазерный луч сканировал поверхность пленки por-Si со скоростью 150 мм/с и частотой повторения импульсов 20 кГц. Обрабатываемая площадь пленки por-Si составляла 10x10 мм. Облучение проводилось импульсами длительностью $\tau = 4-30$ нс, при значениях средней мощности импульса $P = 0,2-5,6$ Вт. При облучении пластина с пленкой por-Si находилась в кювете, заполненной изопропанолом. Толщина слоя изопропанола над поверхностью образца составляла 5 мм. Применение изопропанола обусловлено минимизацией интенсивности окисления поверхности кремниевых кристаллитов пленки por-Si . Режимы облучения образцов P и τ , а также величина средней энергии лазерного импульса E указаны в таблице 1.

Для проведения электрических измерений формировались индиевые омические контакты к пленке por-Si и кремниевой подложке на противоположных поверхностях полупроводниковой структуры. С целью характеристики электрофизических характеристик исследовались 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 por-Si , положительного потенциала – к контакту на кремниевой подложке p -типа (на противоположной поверхности образца).

Исследование вольт-амперных характеристик

Прямые ветви ВАХ в линейном масштабе для диапазона значений напряжения прямого смещения 0-2 В представлены на рисунке 1. С целью сокращения избыточности графической информации на рисунке 1 представлены ВАХ образцов № 5 (+), № 4 (□), № 9 (○), № 14 (Δ), № 1 (◇). Прямые ветви ВАХ образцов № 3, № 8, № 7, № 6 расположены между характеристиками образцов № 4 (□) и № 9 (○). Прямые ветви ВАХ образцов № 16, № 13, № 12, № 11, № 15, № 17 расположены между характеристиками образцов № 14 (Δ) и № 1 (◇). Прямые

ветви ВАХ образцов № 2 и № 10 расположены между характеристиками образцов № 9 (○) и № 14 (Δ).

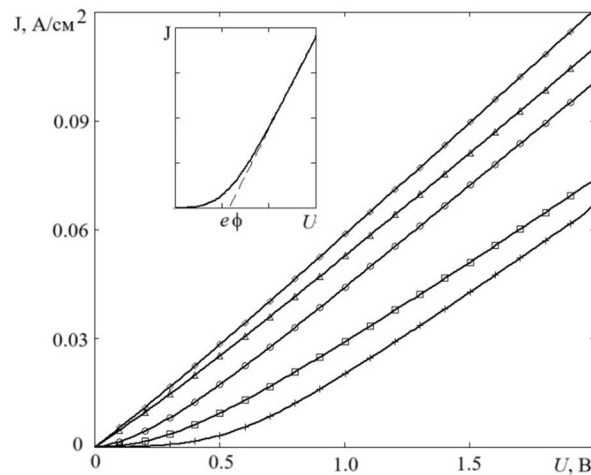


Рисунок 1 – Прямые ветви ВАХ образцов № 5 (+), № 4 (□), № 9 (○), № 14 (Δ), № 1 (◇) в линейном масштабе

Figure 1 – Straight branches of the I-V characteristics of samples № 5 (+), № 4 (□), № 9 (○), № 14 (Δ), № 1 (◇) in a linear scale

Обратные ветви ВАХ образцов № 5 (+), № 4 (□), № 9 (○), № 14 (Δ), №1 (◇) в линейном масштабе для диапазона значений напряжения прямого смещения 0-15 В представлены на рисунке 2.

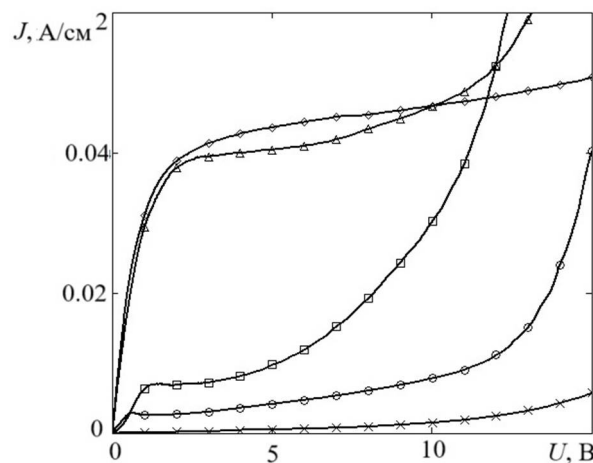


Рисунок 2 – Обратные ветви ВАХ образцов № 5 (+), № 4 (□), № 9 (○), № 14 (Δ), № 1 (◇) в линейном масштабе

Figure 2 – Reverse branches of the I-V characteristics of samples № 5 (+), № 4 (□), № 9 (○), № 14 (Δ), № 1 (◇) in a linear scale

Результаты исследования электрофизических характеристик экспериментальных образцов представлены в таблице 1.

Исследуемые полупроводниковые структуры обладают эффектом выпрямления, степень проявления которого характеризуется коэффициентом выпрямления:

$$K = \frac{I_{IN}}{I_{OUT}}, \quad (1)$$

где I_{IN} и I_{OUT} – величины токов прямого и обратного смещения, соответственно, при напряжении смещения 1 В. Значения K экспериментальных образцов приведены в таблице 1. Наименьшее значение K наблюдается у образцов № 1, № 16, № 17, наибольшее – у образца № 5 (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Физические величины, характеризующие режимы облучения поверхности пленок por-Si, а также результаты исследования электрофизических характеристик экспериментальных образцов

Table 1 – Physical quantities characterizing the irradiation modes of the surface of por-Si films, as well as the results of the study of the electrophysical characteristics of experimental samples

№ обр.	Режимы облучения			Результаты исследования электрофизических характеристик			
	τ , нс	$P_{ср}$, Вт	E , Дж	$e\phi$, эВ	K	N_e , см ⁻³	№ гр.
1	-	-	-	0,06	1,8	$1,40 \cdot 10^{16}$	1
2	4	0,2	$8,00 \cdot 10^{-10}$	0,19	6,2	$9,28 \cdot 10^{14}$	2
3	4	0,4	$1,60 \cdot 10^{-9}$	0,25	17,4	$5,66 \cdot 10^{14}$	2
4	4	0,7	$2,80 \cdot 10^{-9}$	0,36	4,6	$3,54 \cdot 10^{14}$	2
5	4	0,9	$3,60 \cdot 10^{-9}$	0,58	125,2	$2,18 \cdot 10^{14}$	2
6	8	0,6	$4,80 \cdot 10^{-9}$	0,36	3,0	$3,29 \cdot 10^{14}$	2
7	8	1,2	$9,60 \cdot 10^{-9}$	0,29	11,8	$4,00 \cdot 10^{14}$	2
8	8	1,8	$1,44 \cdot 10^{-8}$	0,27	37,4	$4,71 \cdot 10^{14}$	2
9	8	2,4	$1,92 \cdot 10^{-8}$	0,25	15,8	$4,86 \cdot 10^{14}$	2
10	20	1,1	$2,20 \cdot 10^{-8}$	0,20	60,5	$1,26 \cdot 10^{15}$	3
11	30	1,4	$4,20 \cdot 10^{-8}$	0,15	1,9	$3,05 \cdot 10^{15}$	3
12	20	2,2	$4,40 \cdot 10^{-8}$	0,12	1,9	$3,71 \cdot 10^{15}$	3
13	20	3,4	$6,80 \cdot 10^{-8}$	0,13	4,0	$4,41 \cdot 10^{15}$	3
14	30	2,8	$8,40 \cdot 10^{-8}$	0,13	3,3	$4,78 \cdot 10^{15}$	3
15	20	4,5	$9,00 \cdot 10^{-8}$	0,10	3,6	$5,10 \cdot 10^{15}$	3
16	30	4,2	$1,26 \cdot 10^{-7}$	0,08	1,8	$5,79 \cdot 10^{15}$	3
17	30	5,6	$1,68 \cdot 10^{-7}$	0,06	1,8	$8,12 \cdot 10^{15}$	3

На прямых ветвях ВАХ (рисунок 1) в диапазоне напряжений смещения 0-1 В наблюдается нелинейность характеристик, которая наиболее сильно выражена для образцов № 5 (+), № 4 (□), № 9 (○) и слабо проявляется для образцов № 14 (Δ), № 1 (◇). Это свидетельствует о наличии потенциального барьера $e\phi$ в полупроводниковой структуре и образовании области пространственного заряда (ОПЗ). При этом прямые ветви ВАХ могут быть представлены экспоненциальной зависимостью, характерной для барьерных структур:

$$J \sim \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right), \quad (2)$$

где q – элементарный заряд; n – показатель неидеальности; k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура [5]. Для всех образцов $n \approx 2$, следовательно, при малых значениях напряжения прямого смещения ток определяется рекомбинацией носителей в ОПЗ с участием ловушек.

Высота потенциального барьера $e\phi$ экспериментальных образцов определялась по пересечению касательной к прямой ветви ВАХ в диапазоне напряжений 1,5-2 В, с осью напряжений (вставка на рисунке 1). Значения величины $e\phi$ для исследуемых образцов приведены в таблице. Наименьшее значение $e\phi$ отмечается у образцов № 1 и № 17, наибольшее – у образца № 5 (см. таблицу 1).

На рисунке 3 представлены прямые ветви ВАХ в двойном логарифмическом масштабе для образцов № 5 (+), № 4 (□), № 9 (○), № 14 (Δ), № 1 (◇) в диапазоне напряжений смещения 0-15 В. На представленных графиках можно выделить участки I, II и III, которые можно аппроксимировать отрезками прямых линий, что свидетельствует о проявлении различных механизмов переноса носителей заряда в исследуемой полупроводниковой структуре (рисунок 3). Графики на рисунке 3 могут быть представлены степенной зависимостью, используемой в рамках теории токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ):

$$J \sim U^m, \quad (3)$$

где m – показатель степени, характеризующий наклон соответствующего участка ВАХ [6].

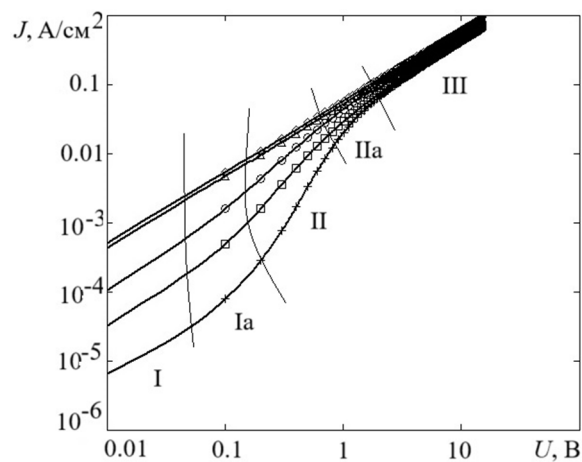


Рисунок 3 – Прямые ветви ВАХ в двойном логарифмическом масштабе образцов № 5 (+), № 4 (□), № 9 (○), № 14 (Δ), № 1 (◇)

Figure 3 – Straight branches of the I-V characteristics in double logarithmic scale of samples № 5 (+), № 4 (□), № 9 (○), № 14 (Δ), № 1 (◇)

На участке I прямых ветвей ВАХ для всех образцов $m = 1$ (рисунок 3). Это означает, что концентрация инжектированных носителей заряда меньше концентрации носителей, термически освобожденных из ловушечных энергетических уровней [6]. На участке II прямых ветвей ВАХ для образцов № 5 и № 4 $m = 2$ (рисунок 3). В рамках теории ТОПЗ это означает, что процессы переноса носителей заряда определяются влиянием моноэнергетического глубокого центра (ловушки) [6]. Для образцов № 9, № 14, № 1 на участке II $m = 1,7-1,4$ (рисунок 3), то есть 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 [6]. На участке III прямых ветвей ВАХ для всех образцов $m = 1,2-1,3$ (рисунок 3), здесь также концентрация инжектированных носителей заряда близка к концентрации термически генерированных носителей с ловушек [6]. На рисунке 3 следует отметить присутствие достаточно протяженных участков Ia и IIa, которые расположены между линейными участками I – II и II – III, соответственно. На участках Ia и IIa показатель m меняется плавно. Это может свидетельствовать о том, что на процессы переноса носителей заряда оказывают влияние несколько групп ловушек с разными энергиями активации [6].

Обратные ветви ВАХ (рисунок 2) по качественному виду характерны для барьерных структур с так называемым «мягким» пробоем, и объясняются лавинным пробоем с участием ловушек, имеющих непрерывное распределение энергии активации [7].

Исследование вольт-фарадных характеристик

С целью получения информации о концентрации ловушек проводилось измерение ВФХ на частоте 1 МГц при обратном смещении. Для оценки влияния ловушек сравнивались ВФХ $C_{IN}(U)$, измеренные при прямом ходе развертки постоянного напряжения смещения 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 [8].

На рисунке 4 представлены петли гистерезиса ВФХ для образцов № 1 и № 5. Для образцов № 1, № 2, а также № 10-№ 17 указанные характеристики имеют одинаковый характер, вследствие чего, на рисунке 4,а для определенности представлены ВФХ образца № 1. Для образцов № 3-№ 9 кривые гистерезиса ВФХ отличаются от образцов № 10-№ 17. На рисунке 4,б для определенности приведены ВФХ образца № 5.

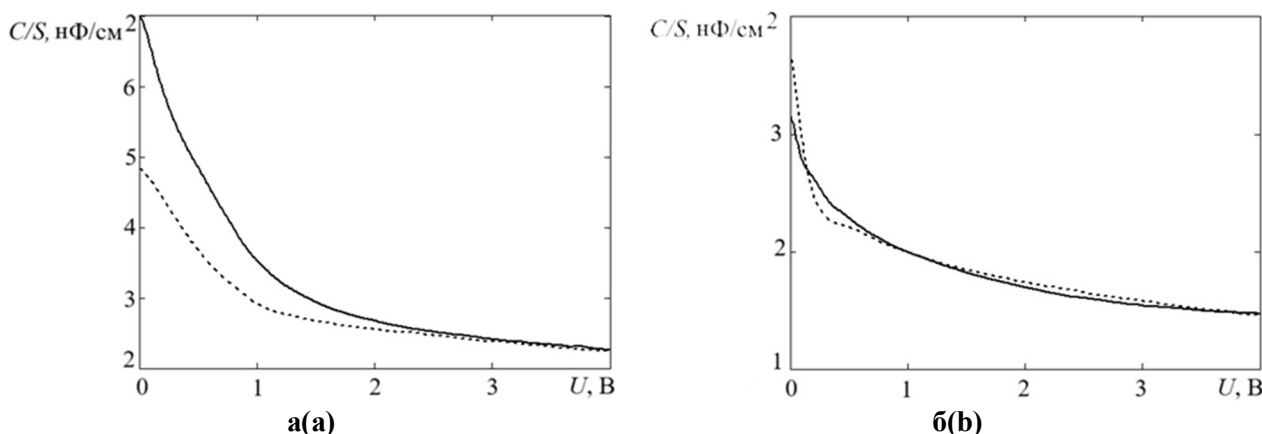


Рисунок 4 – Гистерезис обратных ветвей ВФХ для образцов № 1 (а) и № 5 (б)
Figure 4 – Hysteresis of the reverse branches of the C-V characteristics for samples № 1 (a) and № 5 (b)

Анализируя полосу гистерезиса, образованную кривыми $C_{IN}(U)$ и $C_{OUT}(U)$, можно определить концентрацию ловушек N_t , находящихся в ОПЗ:

$$N_t = \frac{1}{qS} \int_0^{U_m} \frac{|C_{IN}(U) - C_{OUT}(U)|}{|W_{IN}(U) - W_{OUT}(U)|} dU, \quad (4)$$

где q – заряд электрона, S – площадь образца, $W_{IN}(U)$ и $W_{OUT}(U)$ – изменения толщины ОПЗ для прямой и обратной развертки постоянного напряжения смещения U , соответственно, U_m – предельное значение напряжения обратного смещения при измерении ВФХ [8]. Для всех образцов величина U_m составляла 4 В.

В выражении (4) значения $W_{IN}(U)$ и $W_{OUT}(U)$ вычисляются по формулам:

$$W_{IN}(U) = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{C_{IN}(U)}, \quad (5)$$

$$W_{OUT}(U) = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{C_{OUT}(U)}, \quad (6)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость кремния [8].

Значения величин N_t исследуемых образцов, рассчитанные по формуле (4), представлены в таблице 1.

Исследуемые образцы условно разделены на три группы (таблица 1). В первую группу включен образец № 1, не подвергавшийся облучению лазером. Во вторую группу входят образцы, облученные лазером, для которых величина N_t не превышает 10^{14} см^{-3} (№ 2-№ 9). В третью группу включены облученные лазером образцы № 10-№ 17, у которых наблюдается существенный рост N_t по сравнению с образцами второй группы.

Исследование морфологии поверхности

С целью характеристики степени воздействия лазерного излучения на поверхность пленок por-Si проводились исследования морфологии с помощью растровой электронной микроскопии. Использовался электронный микроскоп JSM-6610LV (JEOL, Япония). Изображения поверхности пленок por-Si исследуемых образцов представлены на рисунке 5.

Облучение лазерными импульсами заметно изменяет морфологию пленки por-Si (рисунок 5). Пленка por-Si образца №1 образована массивами нитевидных кремниевых кристаллитов, ориентированных в направлении нормали к поверхности подложки. При этом отдельные блоки кристаллитов имеют резкие границы при выходе на фронтальную поверхность образца (рисунок 5, а). Наличие скругленных каплевидных образований на поверхности образца № 2 является результатом плавления кремниевых кристаллитов пленки por-Si (рисунок 5, б). Увеличение средней энергии лазерного импульса E (таблица 1) приводит к более интенсив-

ному образованию каплевидных частиц и росту их размеров (рисунок 5, б-е). Это свидетельствует о повышении интенсивности плавления кремниевых кристаллитов пленки *por-Si*.

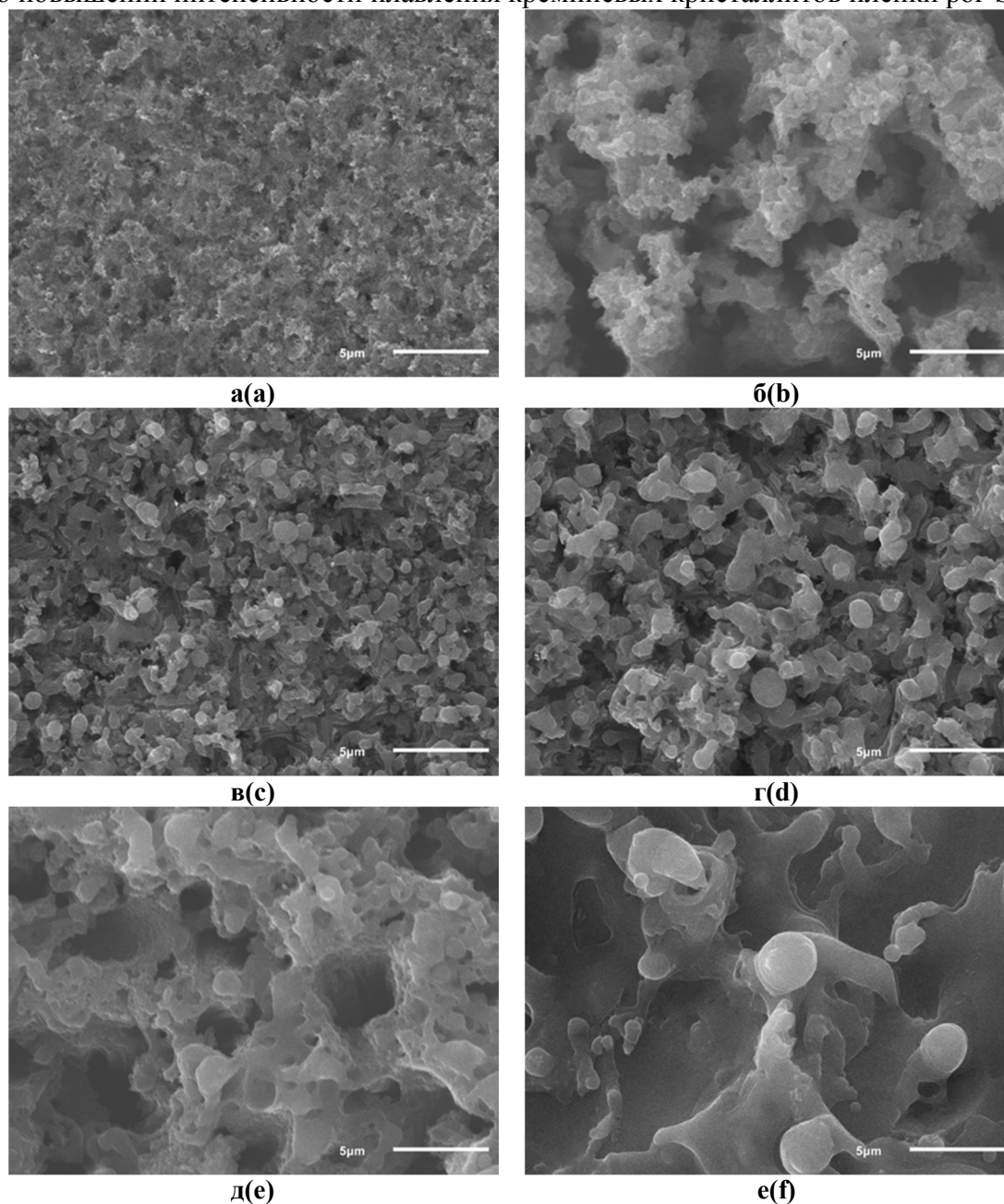


Рисунок 5 – Изображения поверхности пленок *por-Si* образцов

№ 1 (а), № 2 (б), № 5 (в), № 9 (г), № 10 (д), № 17 (е)

Figure 5 – Images of the *por-Si* film surface of samples

№ 1 (а), № 2 (б), № 5 (с), № 9 (д), № 10 (е), № 17 (ф)

Также рост E сопровождается увеличением толщины проплавленного слоя пленки *por-Si* (рисунок 5, б-е). Для образцов третьей группы (таблица 1) плавление пленки *por-Si* протекает наиболее интенсивно по сравнению с образцами второй группы, о чем свидетельствует существенное отличие изображений на рисунке 5, д,е от рисунка 5, б-г.

Обсуждение результатов эксперимента

Исследуемые образцы обладают выпрямляющими свойствами, величина коэффициента выпрямления K изменяется в пределах 1,8-125,2 (таблица 1). Эффект выпрямления можно объяснить возникновением барьерного слоя вблизи границы *por-Si/p-Si* за счет фиксации уровня Ферми на ловушках с энергетическими уровнями E_{ss} , сосредоточенными в припо-

верхностной области кремниевых кристаллитов. Такая ситуация характерна для полупроводниковых структур с пленками por-Si , выращенными на монокристаллических кремниевых подложках методом металл-стимулированного травления [8]. Данную ситуацию иллюстрирует зонная диаграмма структуры por-Si/p-Si в равновесном состоянии, представленная на рисунке 6. Здесь уровень Ферми E_F зафиксирован со стороны области 1, содержащей поверхностные состояния с энергетическими уровнями E_{SS} . Область пространственного заряда преимущественно находится в области 2 (монокристаллический кремний p -типа проводимости) (рисунок 6). Потенциальный барьер $e\phi$, определяемый изгибом зон в ОПЗ, обуславливает эффект выпрямления (рисунок 5) [5,8].

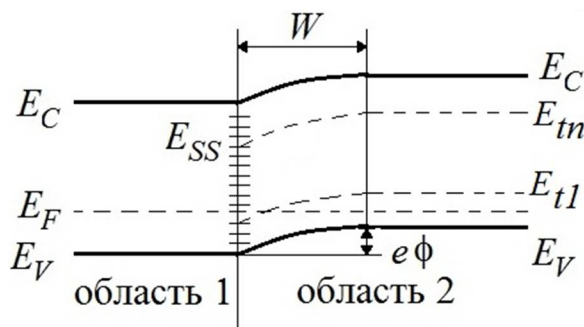


Рисунок 6 – Зонная диаграмма полупроводниковой структуры por-Si/p-Si
Figure 6 – Band diagram of the semiconductor structure por-Si/p-Si

Ловушки оказывают существенное влияние на ВАХ исследуемых образцов. При прямом смещении ток определяется рекомбинацией носителей в ОПЗ с участием ловушек, также проявляется эффект ТОПЗ. При обратном смещении происходит лавинный пробой с участием ловушек, имеющих непрерывное распределение энергии активации.

Из таблицы 1 видно, что наибольшие значения высоты потенциального барьера $e\phi$ (0,25-0,58 эВ) отмечаются у образцов № 3-9 с наиболее низкими значениями N_t ($5,66 \cdot 10^{14}$ - $2,18 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). Для образцов № 1, № 2, а также № 10-17 величина $e\phi$ заметно ниже и изменяется в пределах 0,06-0,20 эВ. Здесь значения N_t выше ($1,26 \cdot 10^{15}$ - $1,40 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) (таблица 1). Также следует отметить, что для указанных групп образцов характер гистерезиса ВФХ заметно отличается (рисунок 4). Для образцов № 3-9 кривая $C_{OUT}(U)$ находится ниже $C_{IN}(U)$ практически во всем диапазоне напряжений постоянного смещения (рисунок 4, а). Согласно [9], уменьшение емкости ОПЗ объясняется опустошением ловушек неосновных носителей заряда. Таким образом, для данной группы образцов электрофизические процессы определяются влиянием ловушек неосновных носителей. Для образцов № 1, № 2, № 10-17 на графике гистерезиса ВФХ (рисунок 4, б) наблюдаются области, где кривая $C_{OUT}(U)$ проходит выше $C_{IN}(U)$, что с точки зрения [9] свидетельствует о перезарядке ловушек основных носителей заряда. Также имеется область, где $C_{OUT}(U)$ меньше, чем $C_{IN}(U)$, здесь перезаряжаются ловушки неосновных носителей (рисунок 4, б). Таким образом, электрофизические процессы в образцах данной группы определяются влиянием обоих типов ловушек. Ловушки представлены глубокими энергетическими уровнями поверхностных состояний E_{SS} на границе областей 1 и 2 (рисунок 6), а также глубокими уровнями E_{tl} и E_{tn} в объеме области 2. Положение энергетических уровней ловушек на рисунке 6 показано условно, так как используемый метод не позволяет определить энергию активации ловушек, он дает информацию только о величине N_t .

Облучение лазером в указанных в таблице 1 режимах вызывает плавление кремниевых кристаллитов пленки por-Si (рисунок 5). Присутствие жидкого изопропанола приводит к быстрому охлаждению расплава в приповерхностной области, что способствует образованию дефектов в приповерхностной области кремниевых кристаллитов. Как отмечается в [10], при этом может даже происходить образование тонкой пленки аморфного кремния на поверхности кремниевых кристаллитов por-Si . В результате в приповерхностной области обра-

зуются дефекты с глубокими энергетическими уровнями (область 1 на рисунке 6). Это приводит к фиксации уровня Ферми на границе между областями 1 и 2 на рисунке 6. В результате образцы с пленками por-Si , подвергнутыми облучению лазером, обладают выпрямляющими свойствами.

Выбирая режим облучения полупроводника лазерными импульсами, можно получить эффект лазерного отжига, приводящего к снижению концентрации дефектов [11]. Механизм отжига определяется нагревом облучаемой области с последующей рекристаллизацией [11]. Также можно инициировать процесс генерации дефектов [11]. При коротких импульсах (единицы наносекунд и менее) в твердом теле не успевает генерироваться достаточно большое число вакансий [11]. Таким образом, снижение величины N_t , наблюдаемое у образцов № 2–№ 5 по сравнению с образцом № 1 (таблица 1), может быть вызвано эффектом лазерного отжига области 2 (рисунок 6) полупроводниковой структуры. Рост N_t для образцов № 6–№ 17 по сравнению с образцом № 5 можно объяснить процессом генерации дефектов в области 2, который интенсифицируется с увеличением значений E и τ . В качестве дефектов, образующих глубокие энергетические уровни E_{tl} и E_{tm} в объеме области 2 (рисунок 6) могут выступать вакансии внутри кремниевых кристаллитов пленки por-Si , а также примеси, возникающие в результате химических реакций, протекающих в результате облучения поверхности образцов, находящихся в контакте с изопропанолом.

Заключение

Исследовано влияние параметров режима облучения наносекундными лазерными импульсами иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1064 нм на динамику изменения концентрации дефектов с глубокими энергетическими уровнями. Показано, что облучение пленки por-Si полупроводниковой структуры por-Si/p-Si при длительности импульса 4 нс и средней энергии импульса $3,60 \cdot 10^{-9}$ Дж приводит к снижению концентрации дефектов с глубокими энергетическими уровнями почти на два порядка величины. Дальнейшее увеличение длительности импульса и его средней энергии приводит к росту концентрации дефектов. Облучение лазером приводит к плавлению поверхностного слоя пленки por-Si . Установлены механизмы процессов, управляющие изменением концентрации дефектов с глубокими энергетическими уровнями. Показано, что электрофизические характеристики исследуемой полупроводниковой структуры por-Si/p-Si в значительной мере определяются ловушками с энергетическими уровнями, характеризующимися сложным распределением в области энергий активации.

Полученные результаты могут быть полезны при создании химических датчиков и фотовольтаических преобразователей солнечной энергии.

Работа выполнена с использованием оборудования регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина (РГРТУ), лазерная обработка поверхности экспериментальных образцов por-Si/p-Si проводилась на оборудовании ООО «Лазервариоракурс» (г. Рязань), полупроводниковые структуры por-Si/p-Si изготовлены в научно-исследовательской лаборатории технологии и физики полупроводниковых структур Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина.

Библиографический список

1. Handbook of porous silicon. Edited by Leigh Canham. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018, 1578 p.
2. Русецкий М.С., Казючиц Н.М., Ивлев Г.Д. Особенности воздействия мощных лазерных импульсов на слой пористого кремния // Сб. науч. тр. III Междунар. науч. конф., (Минск, Республика Беларусь, 2008). С. 150–152.
3. Сорокин Л.М., Соколов В.И., Бурцев А.П., Калмыков А.Е., Григорьев Л.В. Модификация пористого кремния в результате лазерного воздействия // Письма в ЖТФ. 2007, 33 (24). С. 69–75.

4. Рыбина Н.В., Рыбин Н.Б., Хилов В.С., Трегулов В.В., Горбунова Ю.Н. Влияние режимов облучения наносекундным иттербиевым лазером на морфологию пленок пористого кремния // Журнал технической физики. 2024. 94(5). С. 817-822.
5. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов: Пер. с англ.: в 2 т. Т.1. М.: Мир, 1984. 456 с.
6. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М., Мир, 1973, 416 с.
7. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. М., Высш. Шк., 1987, 479 с.
8. Трегулов В.В., Скопцова Г.Н., Рыбин Н.Б., Рыбина Н.В. Влияние отжига на механизмы переноса носителей заряда в полупроводниковой структуре с пленкой пористого кремния // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. С. 215-224.
9. Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука, 1981. 176 с.
10. Мельник Н.Н., Трегулов В.В., Хилов В.С., Рыбина Н.В., Рыбин Н.Б., Косцов Д.С. Новый способ получения пленок аморфного кремния с резонансом Фано // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2024. № 11. С. 52-60.
11. Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А. Лазерное управление процессами в твердом теле // Успехи физических наук, 1996. Т. 166. № 1. С. 3-32.

UDC 538.958:535.8

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR STRUCTURE WITH POROUS SILICON FILM IRRADIATED WITH NANOSECOND YTTERBIUM LASER

V. S. Khilov, graduate student, department of Physics, RSU named for S. Yesenin, Ryazan, Russia; orcid.org/0009-0002-1673-8029, e-mail: laservr@yandex.ru

V. V. Tregulov, Dr. Sc. (tech.), professor, department of Physics, RSU named for S. Yesenin, Ryazan, Russia; orcid.org/0009-0001-1441-6918, e-mail: trww@yandex.ru

A. И. Иванов, graduate student, department of Physics, RSU named for S. Yesenin, Ryazan, Russia; orcid.org/0009-0002-7637-1433, e-mail: alex2012-14@yandex.ru

N. V. Rybina, Ph.D. (Phys. and Math.), 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, department of Micro- and Nanoelectronics, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0003-2000-0158, e-mail: nikolay.rybin@yandex.ru

The effect of irradiation mode parameters with nanosecond laser pulses of ytterbium fiber laser with a wavelength of 1064 nm on the dynamics of changes in concentration of defects with deep energy levels is studied. It is shown that irradiation of por-Si film of por-Si/p-Si semiconductor structure at pulse duration of 4 ns and average pulse energy of $3.60 \cdot 10^{-9}$ J leads to a decrease in concentration of defects with deep energy levels by almost two orders of magnitude. A further increase in pulse duration and its average energy leads to an increase in defect concentration. Laser irradiation leads to melting of surface layer of por-Si film. The mechanisms of processes controlling the change in concentration of defects with deep energy levels are established. The authors show that electrophysical characteristics of the studied por-Si/p-Si semiconductor structure are largely determined by traps with energy levels characterized by complex distribution in the region of activation energies.

Keywords: porous silicon, nanosecond laser pulses, current-voltage characteristics, capacitance-voltage characteristics, deep energy levels, generation-recombination processes.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-256-266

References

1. *Handbook of porous silicon*. Edited by Leigh Canham. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018, 1578 p.
2. **Ruseczkij M.S., Kazyuchicz N.M., Ivlev G.D.** Osobennosti vozdejstviya moshhny'x lazerny'x impul'sov na sloi poristogo kremniya. *Sb. nauch. tr. III Mezhdunar. nauch. konf.*, Minsk, Respublika Belarus'. 2008, pp. 150-152. (in Russian).
3. **Sorokin L.M., Sokolov V.I., Burcev A.P., Kalmykov A.E., Grigor'ev L.V.** Modifikaciya poristogo kremniya v rezul'tate lazernogo vozdejstviya. *Pis'ma v ZhTF*. 2007. 33 (24), pp. 69-75. (in Russian).
4. **Ry'bina N.V., Ry'bin N.B., Xilov V.S., Tregulov V.V., Gorbunova Yu.N.** Vliyanie rezhimov oblucheniya nanosekundny'm itterbievy'm lazerom na morfologiyu plenok poristogo kremniya. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2024, 94(5), pp. 817-822. (in Russian).
5. **Zi S.M.** *Fizika poluprovodnikovyx priborov*: Per. s angl.: v 2 t.t. vol.1, Moscow: Mir. 1984. 456 p.
6. **Lampert M., Mark P.** *Inzhekcionny'e toki v tverdy'x telax*. Moscow: Mir, 1973, 416 p.
7. **Pasy'nikov V.V., Chirkin L.K.** *Poluprovodnikovye pribory*. Moscow: Vy'ssh. Shk., 1987, 479 p.
8. **Tregulov V.V., Skopczova G.N., Ry'bin N.B., Ry'bina N.V.** Vliyanie otzhiga na mexanizmy' perenosa nositelej zaryada v poluprovodnikovoj strukture s plenkoj poristogo kremniya. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2023, no. 84, pp. 215-224. (in Russian).
9. **Berman L.S., Lebedev A.A.** *Emkostnaya spektroskopiya glubokix centrov v poluprovodnikax*. L.: Nauka, 1981. 176 p. (in Russian).
10. **Mel'nik N.N., Tregulov V.V., Xilov V.S., Ry'bina N.V., Ry'bin N.B., Kosczov D.S.** Novy'j sposob polucheniya plenok amorfnoho kremniya s rezonansom Fano. *Kratkie soobshheniya po fizike FIAN*. 2024. no. 11, pp. 52-60. (in Russian).
11. **Mirzoev F.X., Panchenko V.Ya., Shelepin L.A.** Lazernoe upravlenie processami v tverdom tele. *Uspehi fizicheskix nauk*. 1996, vol. 166, no. 1, pp. 3-32. (in Russian).