

В. В. Трегулов

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ С ПЛЕНКОЙ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

64

Представлены результаты исследования годографов импеданса и вольт-фарадной характеристики полупроводниковой структуры кремниевого фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии на основе  $n^+$ - $p$ -перехода с антиотражающей пленкой пористого кремния на поверхности  $n^+$ -области. Построена эквивалентная схема замещения исследуемой полупроводниковой структуры в виде последовательной цепи с элементами постоянной фазы. Предложено объяснение экспериментальной вольт-фарадной характеристики.

*The article introduces the results of the research of the impedance hodographs and the capacitance-voltage characteristics of silicon photovoltaic solar energy converters based on the  $n^+$ - $p$ -junction with the antireflection coating of porous silicon on  $n^+$ -region surface. The equivalent circuit of the semiconductor structure under investigation in the form of a series circuit with the constant phase elements is developed. The form of experimental capacitance-voltage characteristics is proposed.*

**Ключевые слова:** антиотражающее покрытие, вольт-фарадные характеристики, импеданс, пористый кремний, фотоэлектрический преобразователь,  $p$ - $n$ -переход.

**Key words:** antireflection coating, capacitance-voltage characteristics, impedance, porous silicon, a photovoltaic converter,  $p$ - $n$ -junction.

В настоящее время традиционные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) солнечной энергии на основе монокристаллического кремния продолжают занимать важное место, несмотря на успешное развитие альтернативных технологий. Активным элементом таких ФЭП является  $p$ - $n$  переход, сформированный методом термической диффузии. Одним из способов повышения эффективности ФЭП является формирование антиотражающего покрытия на его фронтальной поверхности [1]. В качестве таких покрытий для кремниевых ФЭП могут использоваться

$MgF_2$ ,  $ZnS$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Ta_2O_5$ ,  $SnO_2$ ,  $ZnO$ ,  $Si_3N_4$ ,

а также алмазоподобные углеродные пленки [2].

Существенным недостатком таких покрытий является применение для их формирования дорогостоящего оборудования, реализующего методы плазмохимического или магнетронного осаждения.



Между тем в ряде публикаций, например [3], показано, что в качестве антиотражающего покрытия кремниевых ФЭП с p-n переходом могут успешно использоваться тонкие пленки пористого кремния (por-Si). Пленки por-Si формируются электрохимическим способом, использующим более простое технологическое оборудование, поэтому их применение в качестве антиотражающего покрытия более предпочтительно с точки зрения снижения себестоимости ФЭП.

Вопросам технологии изготовления ФЭП с пленками por-Si посвящено достаточно большое количество публикаций, в частности [3]. В то же время особенности электрофизических процессов в таких полупроводниковых структурах исследованы недостаточно. В связи с этим актуальна задача исследования указанных процессов в обсуждаемом варианте ФЭП.

В нашей работе [4] было показано, что высокочастотная вольт-фарадная характеристика (ВФХ)  $n^+$ -р диода с пленкой por-Si на поверхности  $n^+$ -области имеет вид характерный для структуры металл-диэлектрик-полупроводник с полупроводником n-типа.

Целью настоящей статьи является уточнение модели электрофизических характеристик ФЭП на основе  $n^+$ -р диода с пленкой por-Si на поверхности  $n^+$ -области. Как отмечалось в [5], трудности интерпретации электрофизических характеристик (в частности, ВФХ) для сложных структур препятствуют непосредственному применению методов емкостной спектроскопии в традиционном виде и требуют построения эквивалентных схем замещения. В данной работе для построения эквивалентной схемы замещения исследуемой полупроводниковой структуры используется метод исследования годографов импеданса.

Исследуемые образцы были изготовлены следующим образом.

Сначала методом термической диффузии фосфора в кремниевых пластинах p-типа с удельным сопротивлением 1 Ом·см и ориентацией поверхности (100) были изготовлены  $n^+$ -р переходы с глубиной залегания 0,5 мкм.

Затем в 10 % растворе HF производилось удаление фосфоросиликатного стекла и образцы промывались в дистиллированной воде.

Для контроля электрофизических параметров  $n^+$ -р перехода было отобрано 5 пластин, на которых для электрических измерений были сформированы индиевые контакты к  $n^+$ - и p-областям. Разброс точек ВФХ, измеренных на частоте 1 МГц, для данной партии не превышал 5 %, поэтому далее представлены результаты исследования одного  $n^+$ -р-диода, типичного для изготовленной партии.

Пленка por-Si на поверхности  $n^+$ -области выращивалась методом анодного электрохимического травления. Анодом служила кремниевая пластина с  $n^+$ -р переходом, катодом — пластина из спектрально чистого графита. Электролит состоял из смеси HF (48 %) и  $C_2H_5OH$  (96 %) в соотношении 1:1. Процесс проводился в течение 2 минут при плотности тока 20 мА/см<sup>2</sup>. После формирования пленки por-Si образцы промывались дистиллированной водой и высушивались.

Для электрических измерений к пленке  $\text{por-Si}$  и  $p$ -области образцов формировались индиевые контакты.

Таким образом, были изготовлены образцы, имеющие структуру «металл/пористый кремний/ $n^+p$  переход» ( $M/\text{por-Si}/n^+p$ ). Всего было изготовлено десять образцов  $M/\text{por-Si}/n^+p$  в одинаковых технологических условиях. Значения толщины пленок  $\text{por-Si}$  данной партии образцов менялись в пределах  $0,18-0,23$  мкм. Этот результат получен методом наблюдения интерференции при отражении света от поверхности пленки  $\text{por-Si}$ . Все образцы  $M/\text{por-Si}/n^+p$  данной партии имели ВФХ одинакового вида, относительный разброс экспериментальных точек не превышал 8%. В связи с этим в данной статье представлены результаты исследования одного образца  $M/\text{por-Si}/n^+p$ , типичного для изготовленной партии.

Измерения электрофизических характеристик в исследуемых образцах производились с помощью цифрового измерителя иммитанса E7-20 (МНИПИ, Беларусь) при амплитуде переменного измерительного сигнала 40 мВ и температуре образца 300 К.

На рисунке 1 сплошной линией показана ВФХ структуры  $M/\text{por-Si}/n^+p$ , измеренная на частоте 1 МГц. Знак постоянного напряжения смещения  $V$  соответствует напряжению на контакте к  $\text{por-Si}$ .

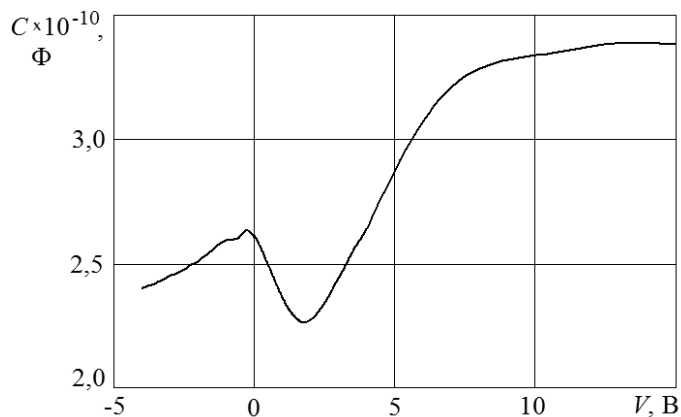


Рис. 1. Вольт-фарадная характеристика структуры  $M/\text{por-Si}/n^+p$

Представленная на рисунке 1 ВФХ характерна для структуры металл-диэлектрик-полупроводник на основе полупроводника  $n$ -типа. В этом случае, согласно [1], насыщение емкости, наблюдаемое при  $V > 9$  В, может быть связано с режимом аккумуляции основных носителей заряда для полупроводника  $n$ -типа. По [6], локальный максимум вблизи  $V = 0$  В объясняется влиянием поверхностных состояний с глубокими энергетическими уровнями.

На рисунке 2 даны ВФХ исходной  $n^+p$  структуры без пленки  $\text{por-Si}$   $C_{n^+p} = f(V)$  и зависимость проводимости от напряжения смещения



$G_{n^+p} = f(V)$  для этой структуры. Указанные зависимости измерены на частоте 1 МГц, знак постоянного смещения  $V$  соответствует напряжению на контакте к  $n^+$ -области.

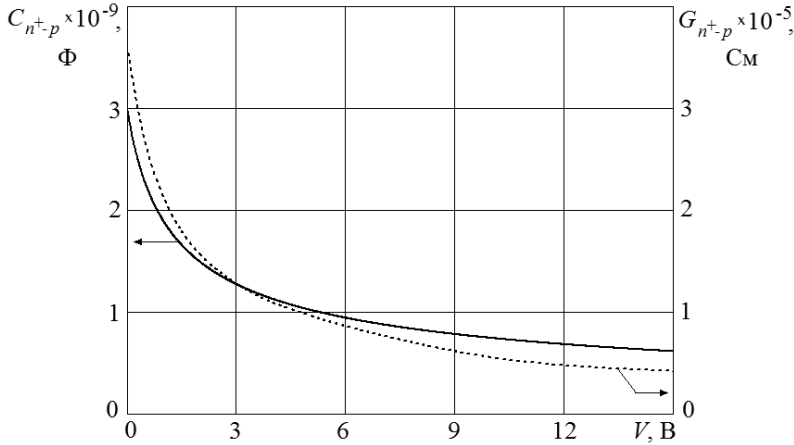


Рис. 2. Зависимость емкости и проводимости  $n^+$ - $p$  структуры от постоянного напряжения смещения

Отображенная на рисунке 2 ВФХ отражает зависимость барьерной емкости  $n^+$ - $p$ - перехода от  $V$  и существенно отличается от ВФХ структуры  $M/p\text{-}por\text{-}Si/n^+p$  (рис. 1) в области  $V \geq 0$ .

Для построения годографов импеданса структуры  $M/p\text{-}por\text{-}Si/n^+p$  были измерены зависимости модуля импеданса  $|Z|$  и угла сдвига фазы  $\varphi$  от частоты в диапазоне  $1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^6$  Гц. Измерения производились для следующих значений  $V$ :

$$10,0 \text{ В}; 4,0 \text{ В}; 2,0 \text{ В}; 0,5 \text{ В}; 0 \text{ В}; -0,5 \text{ В}; -1,0 \text{ В}; -2,0 \text{ В}.$$

Затем для каждого значения частоты вычислялись величины действительной и мнимой частей импеданса  $Z'$  и  $Z''$  соответственно по следующим формулам [7]:

$$Z' = |Z| \cdot \cos(\varphi), \quad Z'' = |Z| \cdot \sin(\varphi).$$

По результатам расчета были построены годографы импеданса в виде зависимости Найквиста  $Z'' = f(Z')$  для указанных выше значений  $V$ .

Графики  $Z'' = f(Z')$  для  $V \geq 0$  и  $V < 0$  приведены на рисунках 3 и 4. Увеличению частоты на графиках  $Z'' = f(Z')$  соответствует снижение значений по оси  $Z'$ .

В области  $V \geq 0$  годографы импеданса представляют собой наложение двух полуокружностей (рис. 3). Левая полуокружность находится в области более высоких частот, правая — в области более низких частот. Далее будем называть левую полуокружность высокочастотной, правую — низкочастотной.

На рисунке 3 высокочастотная полуокружность наиболее заметно проявляется при напряжениях смещения 0 В и 0,5 В, с дальнейшим ростом  $V$  ее вклад существенно снижается. Обе полуокружности деформированы вдоль оси  $Z''$ , поэтому для описания частотной зависимости полного импеданса  $Z(\omega)$  используют элемент постоянной фазы (СРЕ)

$$Z(\omega) = \frac{R}{1 + AR(j\omega)^\Psi},$$

где  $\omega$  – циклическая частота;  $j$  – мнимая единица;  $R$  – активное сопротивление;  $A$  – параметр элемента постоянной фазы;  $\Psi$  – показатель, характеризующий неоднородность свойств системы [7]. При  $\Psi = 1$  СРЕ вырождается в конденсатор, при  $\Psi = 0$  – в резистор [7].

68

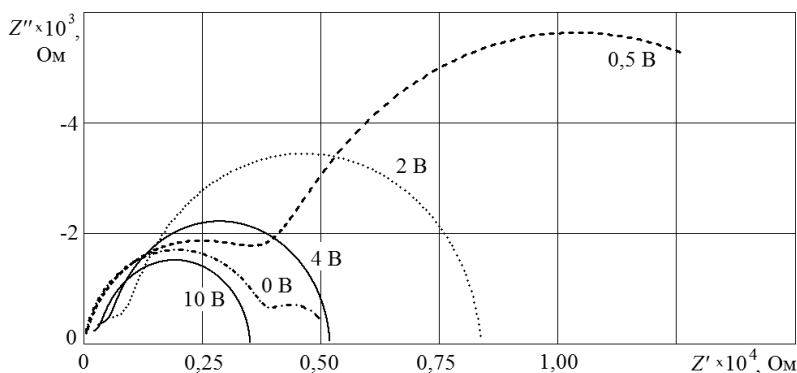


Рис. 3. Годографы импеданса структуры М/por-Si/n<sup>+</sup>-р для области  $V \geq 0$  при разных значениях  $V$

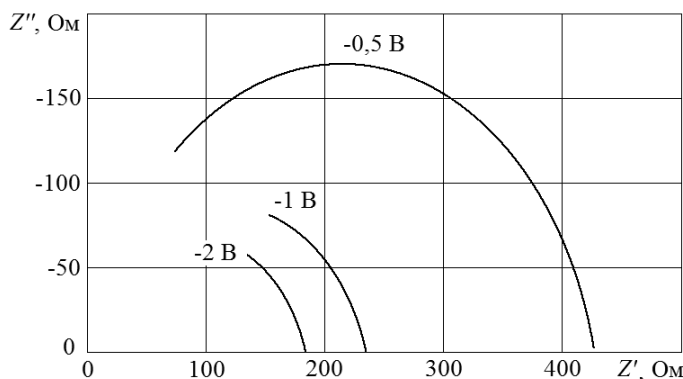


Рис. 4. Годографы импеданса структуры М/por-Si/n<sup>+</sup>-р для области  $V < 0$  при разных значениях  $V$

Годографы на рисунке 3 были аппроксимированы следующим выражением для полного импеданса, составленным с учетом модели элемента постоянной фазы [7]:



$$Z(\omega) = R_0 + \frac{R_1}{1 + A_1 R_1 (j\omega)^{\Psi_1}} + \frac{R_2}{1 + A_2 R_2 (j\omega)^{\Psi_2}}, \quad (1)$$

где  $R_0$  – омическое сопротивление контактов и квазинейтральной части р-области структуры;  $R_1, R_2, A_1, A_2$  – активные сопротивления и параметры элементов постоянной фазы СРЕ<sub>1</sub> и СРЕ<sub>2</sub> соответственно;  $\Psi_1, \Psi_2$  – показатели неоднородности.

В выражении (1) второе слагаемое (элемент СРЕ<sub>1</sub>) соответствует высокочастотной полуокружности, третье слагаемое (СРЕ<sub>2</sub>) – низкочастотной. Величина  $R_0$  определяется экстраполяцией зависимости  $Z'' = f(Z')$  до пересечения с осью  $Z'$  в области высоких частот.

В области  $V < 0$  на годографах импеданса в исследуемом диапазоне частот проявляются только низкочастотные фрагменты полуокружностей (рис. 4). По-видимому, вклад высокочастотной полуокружности в этом случае имеет место при частотах, больших верхней границы исследуемого диапазона, которая в нашем случае ограничена возможностями используемого оборудования.

С ростом абсолютного значения  $V$  на рисунке 4 наблюдается снижение сопротивления  $R_2$ . Это сопротивление определяется по пересечению полуокружности с осью  $Z'$  в области низких частот.

Для аппроксимации годографов импеданса, представленных на рисунке 4 также использовалось выражение (1), в котором было исключено второе слагаемое, отвечающее за высокочастотную компоненту.

Численные значения величин, входящих в выражение (1), полученные при аппроксимации экспериментальных годографов импеданса на рисунках 3 и 4, представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Результат аппроксимации годографов импеданса структуры М/por-Si/n<sup>+</sup>-р, измеренных при разных значениях V**

V, В	R <sub>0</sub> , Ом	R <sub>1</sub> , Ом	A <sub>1</sub> , Ф	Ψ <sub>1</sub>	R <sub>2</sub> , Ом	A <sub>2</sub> , Ф	Ψ <sub>2</sub>
10,0	2,0	360	1,00 · 10 <sup>-9</sup>	0,85	3150	6,00 · 10 <sup>-10</sup>	0,97
4,0	2,0	580	4,30 · 10 <sup>-10</sup>	0,88	4610	5,10 · 10 <sup>-10</sup>	0,97
2,0	2,0	970	1,00 · 10 <sup>-9</sup>	0,80	7400	6,90 · 10 <sup>-10</sup>	0,95
0,5	2,0	4000	2,10 · 10 <sup>-9</sup>	0,86	13000	2,00 · 10 <sup>-8</sup>	0,90
0	2,0	3850	1,00 · 10 <sup>-9</sup>	0,91	1340	9,00 · 10 <sup>-8</sup>	0,93
-1,0	2,0	-	-	-	425	9,00 · 10 <sup>-9</sup>	0,86
-2,0	2,0	-	-	-	233	9,00 · 10 <sup>-9</sup>	0,81

Таким образом, общая схема замещения исследуемой структуры в соответствии с выражением (1) может быть представлена в виде последовательной цепочки, изображенной на рисунке 5. При  $V < 0$  в эквивалентной схеме остаются только элементы  $R_0, R_2$  и  $A_2$ .

Важно отметить, что величины  $A_1$  и  $A_2$  нельзя напрямую использовать для построения модели ВФХ структуры М/por-Si/n<sup>+</sup>-р, так как

$\Psi_1 \neq 1$  и  $\Psi_2 \neq 1$ . Как видно из таблицы 1, для высокочастотной и низкочастотной составляющей выполняется условие  $0,8 \leq \Psi < 1$ . Согласно [8] это означает, что  $A_1$  и  $A_2$  в выражении (1) характеризуют частотную зависимость емкости.

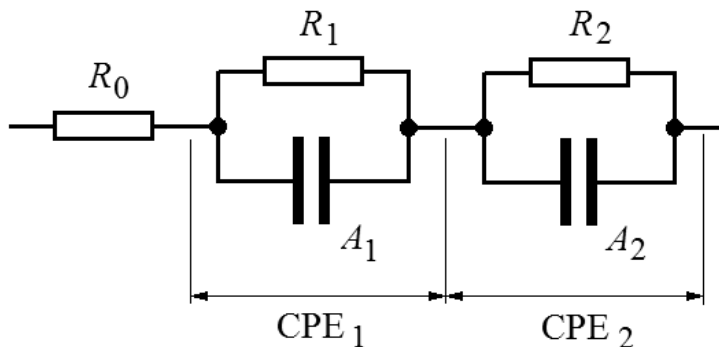


Рис. 5. Схема замещения структуры М/pор-Si/n<sup>+</sup>-р

Такая ситуация имеет место в случае присутствия в исследуемой структуре набора релаксаторов с некоторым распределением постоянных времени  $\tau_i = R_i C_i$ . Возникающая в результате дисперсия импеданса характеризуется элементом СРЕ и для полупроводниковых структур, согласно [5], обусловлена эффектами перезарядки глубоких энергетических уровней.

С целью выяснения вклада n<sup>+</sup>-р перехода в годографы импеданса структуры М/pор-Si/n<sup>+</sup>-р при  $V \geq 0$  были вычислены значения действительной и мнимой составляющей импеданса n<sup>+</sup>-р перехода  $Z'_{n^+-p}$  и  $Z''_{n^+-p}$  соответственно по следующим формулам:

$$Z'_{n^+-p} = R_p + \frac{R_{n^+-p}}{1 + \omega^2 C_{n^+-p}^2 R_{n^+-p}^2}, \quad (2)$$

$$Z''_{n^+-p} = \frac{\omega C_{n^+-p} R_{n^+-p}^2}{1 + \omega^2 C_{n^+-p}^2 R_{n^+-p}^2}, \quad (3)$$

где  $C_{n^+-p}$  и  $R_{n^+-p}$  — емкость и сопротивление области пространственного заряда n<sup>+</sup>-р перехода, соответственно;  $R_p$  — сопротивление квазинейтральной части р-области. Причем  $R_{n^+-p} = \frac{1}{G_{n^+-p}}$ .

Формулы (2) и (3) получены на основе общих представлений о диодах с р-п переходом [1] и отражают параллельную схему замещения области пространственного заряда с учетом сопротивления квазинейтральной части базовой области.



Для вычисления  $Z'_{n^+-p}$  и  $Z''_{n^+-p}$  использовались зависимости

$$C_{n^+-p} = f(V) \text{ и } G_{n^+-p} = f(V),$$

измеренные на частоте 1 МГц (см. рис. 2). Следовательно, результат не учитывает влияние дефектов с глубокими энергетическими уровнями, которое проявляется в области более низких частот.

Величина  $R_p$  определялась по формуле

$$R_p = \rho \frac{l}{S}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление р-области ( $\rho = 1$  Ом см);  $l$  – ее толщина (фактически толщина кремниевой пластины,  $l = 0,018$  см);  $S$  – площадь  $n^+$ -р перехода ( $S = 0,065$  см<sup>2</sup>).

Значение  $R_p$ , вычисленное по (4), составило 0,28 Ом. Таким образом, значения  $Z'_{n^+-p}$  и  $Z''_{n^+-p}$ , вычисляемые по формулам (2) и (3) с использованием (4), не учитывают сопротивление металлических контактов к р-области и слою  $\text{por-Si}$ , а также влияние дефектов с глубокими энергетическими уровнями в области пространственного заряда  $n^+$ -р перехода и квазинейтральной части р-области.

Значения  $Z'_{n^+-p}$  и  $Z''_{n^+-p}$ , рассчитанные для напряжений постоянного смещения

$$0 \text{ В}; 0,5 \text{ В}; 2,0 \text{ В}; 4,0 \text{ В}; 10,0 \text{ В},$$

представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Значения действительной и мнимой составляющих импеданса  $n^+$ -р области**

$V, \text{ В}$	$Z'_{n^+-p}, \text{ Ом}$	$Z''_{n^+-p}, \text{ Ом}$
0	0,38	-53,01
0,5	0,41	-70,34
2,0	0,46	-106,60
4,0	0,49	-141,13
10,0	0,53	-213,49

Из таблицы 2 видно, что значения  $Z'_{n^+-p}$  и  $Z''_{n^+-p}$  находятся в пределах высокочастотных полуокружностей годографов импеданса для соответствующих значений  $V$ , представленных на рисунке 3. Таким образом, элемент  $\text{CPE}_1$  на эквивалентной схеме (рис. 5) в области высоких частот отражает работу  $n^+$ -р фрагмента исследуемой структуры без учета влияния дефектов с глубокими энергетическими уровнями.

В ряде работ, например [9; 10], отмечается, что в процессе роста пленки  $\text{por-Si}$  возникают дефекты с глубокими энергетическими уровнями как в объеме формирующейся пористой пленки, так и на границе





между ней и монокристаллическим кремнием (поверхностные состояния). В объеме  $\text{por-Si}$  находятся глубокие энергетические уровни, выступающие в роли ловушек электронов с достаточно большими временами релаксации (до  $10^5$  с) [9]. Поверхностные состояния на границе между  $\text{por-Si}$  и монокристаллическим кремнием характеризуются более быстрыми процессами перезарядки [9; 10]. В [10] влияние этих поверхностных состояний проявлялось в виде локального максимума на ВФХ вблизи  $V = 0$  В, измеренной на частоте 1 МГц. Такая же особенность ВФХ имеет место для поверхностных состояний на границе  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  в структуре металл-диэлектрик-полупроводник [6].

Таким образом, можно считать, что элемент  $\text{CPE}_2$  эквивалентной схемы замещения структуры  $\text{M/por-Si/n}^+\text{-p}$  (рис. 5) определяется главным образом дефектами с глубокими энергетическими уровнями, находящимися в объеме пленки  $\text{por-Si}$  и характеризующимися наиболее длительными временами перезарядки. Поверхностные состояния с малыми временами релаксации могут проявляться в низкочастотной области элемента  $\text{CPE}_1$  эквивалентной схемы.

Вид годографов импеданса при  $V < 0$ , представленных на рисунке 4, может быть объяснен следующим образом. Условие  $V < 0$  соответствует прямому смещению  $\text{n}^+\text{-p}$  перехода, при этом его область пространственного заряда обогащается основными носителями. В результате его сопротивление снижается и стремится к сопротивлению квазинейтральной части  $\text{p}$ -области. При этом основной вклад в импеданс исследуемой структуры дает фрагмент  $\text{M/por-Si/n}^+\text{-Si}$  и квазинейтральная часть  $\text{p}$ -области. Как отмечалось ранее, вклад  $\text{n}^+\text{-p}$  перехода в годограф импеданса при  $V < 0$  может иметь место при частотах измерительного сигнала, больших верхней границы исследуемого диапазона.

Руководствуясь представленными соображениями и принимая во внимание то, что схема замещения структуры  $\text{M/por-Si/n}^+\text{-p}$  имеет вид последовательной цепи (рис. 5), запишем для полной емкости следующее выражение:

$$C = \frac{C_1 C_{\text{n}^+\text{-p}}}{C_1 + C_{\text{n}^+\text{-p}}}, \quad (5)$$

где  $C_1$  — емкость участка  $\text{M/por-Si/n}^+\text{-Si}$  исследуемой структуры.

На основе полученных в данной статье результатов можно предложить следующее объяснение вида ВФХ структуры  $\text{M/por-Si/n}^+\text{-p}$ , представленной на рисунке 1.

В области  $V \geq 0$  полная емкость структуры определяется последовательным соединением барьерной емкости  $\text{n}^+\text{-p}$  перехода и емкости области  $\text{M/por-Si/n}^+$  в соответствии с выражением (5). В результате этого ВФХ имеет вид, характерный для структуры металл-диэлектрик-полупроводник с полупроводником  $\text{n}$ -типа. Рост емкости и ее насыщение при увеличении  $V$  на рисунке 1 может быть связан с влиянием заряда, захваченного ловушками в объеме  $\text{por-Si}$ .



Локальный максимум вблизи  $V = 0$  В на рисунке 1 связан с влиянием поверхностных состояний на границе  $\text{por-Si}/\text{n}^+\text{-Si}$ . При  $V < 0$  вид ВФХ структуры  $\text{M}/\text{por-Si}/\text{n}^+\text{-p}$  (см. рис. 1) также определяется поверхностными состояниями.

Таким образом, в данной статье на основе исследования годографов импеданса построена эквивалентная схема замещения полупроводниковой структуры  $\text{M}/\text{por-Si}/\text{n}^+\text{-p}$ .

В результате анализа схемы замещения предложено объяснение электрофизических процессов, определяющих вид вольт-фарадной характеристики этой структуры.

Полученные в настоящей работе результаты могут быть полезны для объяснения электрофизических процессов в ФЭП и других полупроводниковых приборах, содержащих тонкую пленку  $\text{por-Si}$ , сформированную над  $\text{p-n}$  переходом.

### Список литературы

1. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984.
2. Клюй Н. И., Литовченко В. Г., Лукьянов А. Н. и др. Влияние условий осаждения на просветляющие свойства алмазоподобных углеродных пленок для солнечных элементов на основе кремния // Журнал технической физики. 2006. Т. 76, № 5. С. 122–126.
3. Panes P., Lipinski M., Czternastek H. Porous silicon layer as antireflection coating in solar cells // Optoelectronics review. 2000. № 8(1). P. 57–59.
4. Трегулов В. В. Особенности высокочастотной вольт-фарадной характеристики фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии на основе кремниевого  $\text{p-n}$ -перехода с антиотражающим слоем пористого кремния // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, № 9. С. 153–154.
5. Поклонский Н. А., Горбачук Н. И., Шпаковский С. В. Эквивалентная схема замещения кремниевых диодов, облученных высокими флюенсами электронов // Там же. 2010. Т. 80, № 10. С. 74–82.
6. Пека Г. П. Физические явления на поверхности полупроводников. Киев, 1984.
7. Barsoukov E., Macdonald J. R. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment and Applications. New Jersey, 2005.
8. Стройнов З. Б., Графов Б. М., Саввова-Стройнова Б. Электрохимический импеданс. М., 1991.
9. Венгер Е. Ф., Каганович Э. Б., Кириллова С. И. и др. Исследование структур пористый кремний/кремний методом температурных зависимостей фотоэдс // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33, № 11. С. 1330–1333.
10. Евтух А. А., Каганович Э. Б., Манойлов Э. Г. и др. Механизм токопрохождения в электролюминесцентных структурах пористый кремний/монокристаллический кремний // Там же. 2006. Т. 40, № 2. С. 180–184.

### Об авторе

Вадим Викторович Трегулов — канд. техн. наук, доц., Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина.

E-mail: trww@yandex.ru

### About the author

Dr Vadim Tregulov, ass. prof., Ryazan State University named for S. Yesenin.

E-mail: trww@yandex.ru