

07

Особенности частотной зависимости вольт-фарадных характеристик полупроводниковой структуры фотоэлектрического преобразователя на основе $p-n$ -перехода с антиотражающей пленкой пористого кремния

© В.В. Трегулов

Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина,
390000 Рязань, Россия
e-mail: trww@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 23 февраля 2018 г.)

Проведены исследования частотной зависимости вольт-фарадных характеристик полупроводниковой структуры, содержащей антиотражающую пленку пористого кремния, сформированную электрохимическим травлением над $p-n$ -переходом. Также исследованы спектры фотолюминесценции слоев пористого кремния экспериментальных образцов. Установлено, что характер вольт-фарадных характеристик определяется конкуренцией влияния емкости $p-n$ -перехода и поверхностной структуры, возникающей в пленке пористого кремния вследствие неоднородности ее строения. Предложена модель строения слоев исследуемой полупроводниковой структуры и емкостная схема замещения.

DOI: 10.21883/JTF.2018.12.46789.83-18

Введение

Пленка пористого кремния (por-Si), применяемая в качестве антиотражающего покрытия, способствует существенному повышению эффективности кремниевого фотоэлектрического преобразователя на основе $p-n$ -перехода [1]. Подобные полупроводниковые структуры актуальны для применения в солнечной энергетике и создания датчиков оптического излучения [1,2]. В настоящее время основное внимание уделяется исследованиям оптических характеристик (отражательная способность поверхности) и механизмов токопрохождения в указанных полупроводниковых структурах [1]. Изучению вольт-фарадных характеристик (ВФХ) уделяется меньше внимания. Вместе с тем изучение ВФХ актуально, так как позволяет уточнить модель строения слоев полупроводниковой структуры. В работе [3] представлено объяснение особенностей высокочастотной ВФХ полупроводниковой структуры с пленкой por-Si, сформированной над $p-n$ -переходом.

Основной задачей настоящей работы является исследование особенностей частотной зависимости вольт-фарадных характеристик обсуждаемой полупроводниковой структуры. Целью исследований является уточнение модели внутреннего строения слоев изучаемой полупроводниковой структуры.

Описание образцов и методики исследования

В качестве подложек использовались кремниевые монокристаллические пластины p -типа проводимости с удельным сопротивлением $1 \Omega \cdot \text{cm}$ и ориентацией

поверхности (100). Подложки подвергались жидкостному химическому травлению в водном растворе KOH. После травления формировался n^+-p -переход с глубиной залегания не более $0.5 \mu\text{m}$ с помощью термической диффузии фосфора при температуре 1100°C в течение 10 min. Пленка por-Si формировалась на поверхности n^+ -слоя анодным электрохимическим травлением в гальваностатическом режиме при плотности тока 20 mA/cm^2 . Использовался электролит, состоящий из смеси HF и $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (соотношение 1:1). Были изготовлены три образца — № 2, № 3 и № 4 при значениях длительности электрохимического травления 5, 10 и 30 s соответственно. Образец № 1 представляет собой полупроводниковую структуру с диффузионным n^+-p -переходом без пленки por-Si. Для проведения электрических измерений формировались серебряные контакты к пленке por-Si и кремниевой подложке p -типа (на противоположных поверхностях полупроводниковой структуры). Использовалась серебряная паста типа FC-1127 (ОАО „Монокристалл“, Россия), применяемая при изготовлении фронтальных контактов кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечного излучения. Образцы № 2–4 аналогичны полупроводниковым структурам, исследованным в работах [3–5].

Измерения ВФХ проводились с помощью цифрового измерителя иммитанса E7-20 (МНИПИ, Белоруссия) при значениях частоты тестового сигнала 1, 10, 100 kHz, 1 MHz. Спектры фотолюминесценции пленок por-Si измерялись спектрометром USB-4000-VIS-NIR (Ocean Optics, USA). Возбуждение фотолюминесценции осуществлялось полупроводниковым диодным лазером, работающим на длине волны 405 nm, мощность излучения составляла 2 mW. Все измерения проводились при температуре образцов 300 K.

Результаты эксперимента

Для образца № 1 измерение ВФХ проводилось на частоте измерительного сигнала 1 МГц, для образцов № 2–4 — на частотах 1, 10, 100 кГц, 1 МГц. Измеренные ВФХ представлены на рис. 1–3 в виде зависимостей $(C/S)^{-2} = f(U)$, где C — емкость образца, S — его площадь, U — постоянное напряжение обратного смещения. Для исследуемых образцов обратное смещение соответствует положительным значениям U , полярность определяется знаком напряжения на контакте к por-Si . Высокочастотные ВФХ (1 МГц) образца № 1 приводятся на рис. 1–3 с целью сравнения с ВФХ образцов № 2–4.

Спектры фотолюминесценции пленок por-Si образцов № 2–4 представлены на рис. 4.

Обсуждение результатов эксперимента

Линейность высокочастотной ВФХ (1 МГц) образца № 1, представленной на рис. 1–3, свидетельствует о том, что p - n -переход в исследуемых полупроводниковых структурах перед формированием пленки por-Si являлся резким. Вид высокочастотных ВФХ (1 МГц) образцов № 2–4 существенно отличается от образца № 1 (рис. 1–3). В работе [3] указанная особенность высокочастотных ВФХ изучаемых образцов была объяснена формированием поверхностной МДП-структуры на n^+ -слое в ходе электрохимического травления. В качестве диэлектрического слоя выступает поверхностная область por-Si , содержащая наиболее мелкие кремниевые кристаллиты и включения окислов кремния SiO_x . Полупроводниковый слой рассматриваемой МДП-структуры находится на поверхности более крупных кремниевых кристаллитов в пленке por-Si . При образовании

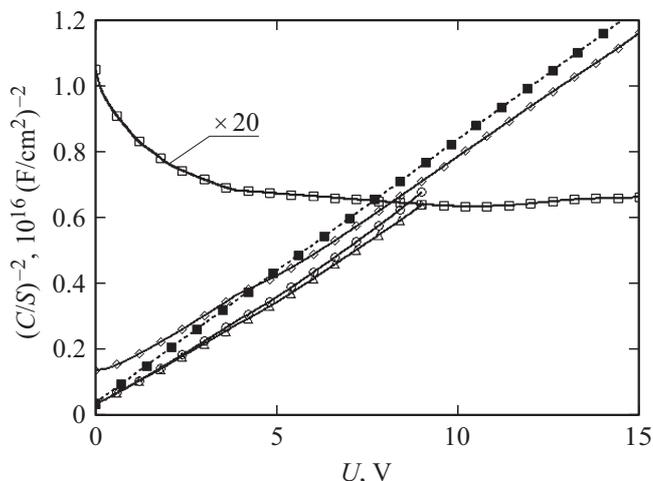


Рис. 1. ВФХ образцов № 1 и № 2 при разных частотах измерительного сигнала: ■ — для образца № 1 при частоте 1 МГц, □ — для образца № 2 при частоте 1 МГц, ◇ — для образца № 2 при частоте 100 кГц, ○ — для образца № 2 при частоте 10 кГц, △ — для образца № 2 при частоте 1 кГц.

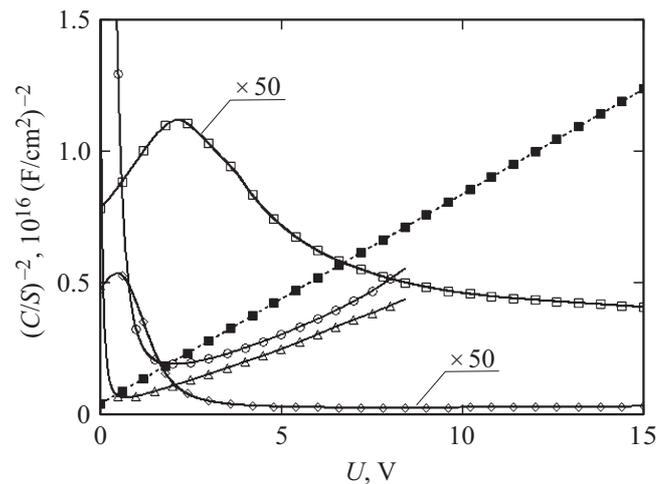


Рис. 2. ВФХ образцов № 1 и № 3 при разных частотах измерительного сигнала: ■ — для образца № 1 при частоте 1 МГц, □ — для образца № 3 при частоте 1 МГц, ◇ — для образца № 3 при частоте 100 кГц, ○ — для образца № 3 при частоте 10 кГц, △ — для образца № 3 при частоте 1 кГц.

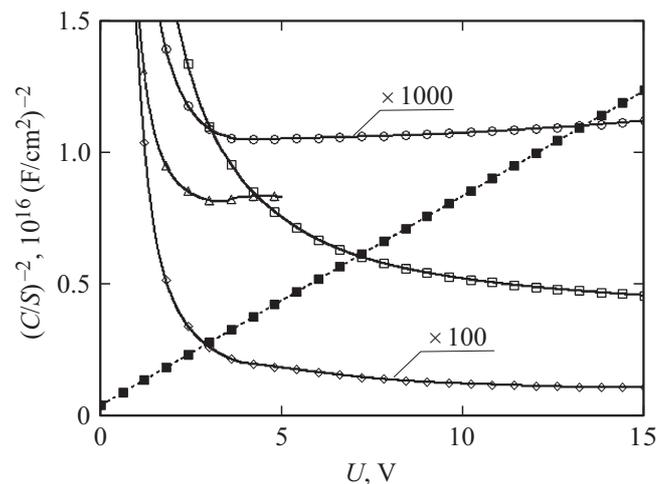


Рис. 3. ВФХ образцов № 1 и № 4 при разных частотах измерительного сигнала: ■ — для образца № 1 при частоте 1 МГц, □ — для образца № 4 при частоте 1 МГц, ◇ — для образца № 4 при частоте 100 кГц, ○ — для образца № 4 при частоте 10 кГц, △ — для образца № 4 при частоте 1 кГц.

por-Si может происходить электрическая пассивация примесных атомов исходной n^+ -области кремния за счет внедрения водорода при электрохимическом травлении. В результате в полупроводниковом слое поверхностной МДП-структуры концентрация мелких доноров может быть меньше, чем в исходном n^+ -кремнии.

На частоте 100 кГц ВФХ образца № 2 (рис. 1) при значениях U в диапазоне 0–5 В отклоняется от линейной зависимости, а при $U > 5$ В — близка к линейной. Это можно объяснить тем, что при $U > 5$ В вид ВФХ главным образом определяется влиянием барьерной емкости резкого p - n -перехода, а при $U < 5$ В

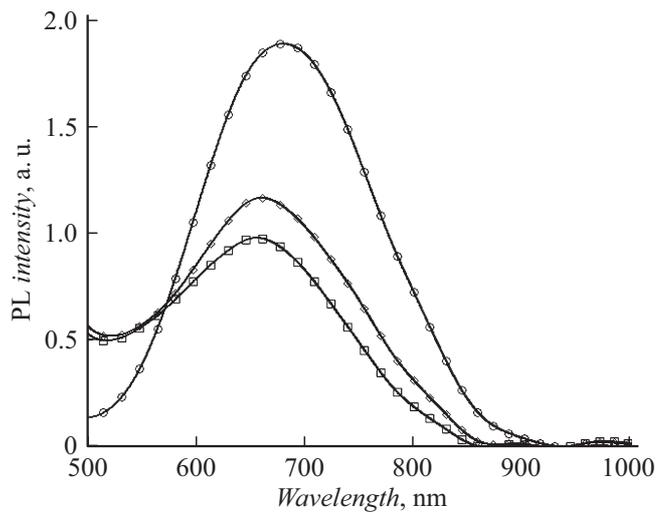


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции образцов № 2 (□), № 3 (◇), № 4 (○).

на ВФХ преобладающее влияние оказывает поверхностная МДП-структура. При частотах измерительного сигнала 1 и 10 kHz ВФХ образца № 2 линейны (рис. 1). Следовательно, в указанных условиях ВФХ образца № 2, главным образом, определяются влиянием барьерной емкости резкого *p-n*-перехода.

Для образца № 3 (рис. 2) при частотах 1 MHz, 100 и 10 kHz вид ВФХ существенно отличается от характерного для барьерной емкости резкого *p-n*-перехода. На частоте 1 kHz ВФХ образца № 3 (рис. 2) при $U > 2.5$ V становится линейной, что может быть связано с преобладающим влиянием барьерной емкости резкого *p-n*-перехода.

Вид ВФХ образца № 4 для всех значений частоты измерительного сигнала (рис. 3) не характерен для барьерной емкости *p-n*-перехода. Это можно объяснить преобладанием влияния поверхностной МДП-структуры.

Наблюдаемый характер частотной зависимости ВФХ образцов № 2–4 во многом определяется особенностями структуры пленки *por-Si*. В ряде работ, например [6–8], отмечается, что пленка *por-Si* состоит из слоев с различающимися свойствами. Слои *por-Si*, находящиеся ближе к границе с монокристаллическим кремнием, образованы более крупными кремниевыми кристаллитами, не создающими эффективной фотолюминесценции в видимой области спектра. Слой *por-Si*, находящийся ближе к внешней поверхности, состоит из наиболее мелких кремниевых кристаллитов. Согласно [6–8], именно этот слой обеспечивает интенсивную фотолюминесценцию *por-Si* в видимом диапазоне.

Следует отметить, что в работах [6–8] исследовались образцы с достаточно толстыми пленками *por-Si* (несколько микрометров). В работе [7] общая толщина пленки *por-Si* исследуемых образцов составляла 8–175 μm , при этом толщина приповерхностного слоя *por-Si*, содержащего наиболее мелкие кристалли-

ты составляла 1–20 μm . Толщина пленки *por-Si* образцов № 2–4, исследуемых в настоящей работе, сравнима с глубиной залегания *p-n*-перехода (0.5 μm), что существенно меньше, чем в работах [6–8]. В связи с этим обстоятельством для уточнения структуры слоев пленки *por-Si* образцов № 2–4 измерялись спектры фотолюминесценции (рис. 4).

С ростом длительности процесса электрохимического травления наблюдается увеличение интенсивности фотолюминесценции, максимум спектра сдвигается в сторону более длинных волн (рис. 4). Рост интенсивности фотолюминесценции может быть объяснен увеличением толщины приповерхностного слоя пленки *por-Si*, содержащего наиболее мелкие кристаллиты. Заметное расширение спектральной линии для образца № 4 по сравнению с образцами № 2 и № 3 в сторону больших длин волн (рис. 4) с точки зрения квантово-размерной модели *por-Si* может означать увеличение количества более крупных кристаллитов [9]. Этим также можно объяснить сдвиг максимума спектра фотолюминесценции в сторону более длинных волн (рис. 4).

Таким образом, из анализа спектров на рис. 4 можно заключить, что в образцах № 2–4 с увеличением длительности процесса электрохимического травления возрастает толщина приповерхностного слоя пленки *por-Si*, содержащего наиболее мелкие кремниевые кристаллиты, отвечающие за фотолюминесценцию в видимой области спектра. Следовательно, увеличение длительности электрохимического травления должно приводить к снижению емкости приповерхностного слоя *por-Si* исследуемых образцов.

С точки зрения электрофизических процессов приповерхностный слой *por-Si* может обеспечивать туннельный механизм токопрохождения. Так, в работе [10] отмечалось, что туннелирование носителей заряда может происходить внутри пленки *por-Si* между энергетическими уровнями ловушек на поверхности кремниевых кристаллитов через барьеры SiO_x . В работе [4] туннелирование носителей заряда наблюдалось в полупроводниковой структуре, аналогичной образцу № 2, которая исследовалась методом температурной зависимости вольт-амперных характеристик.

На основе представленных результатов можно предложить модель строения слоев исследуемой полупроводниковой структуры в виде показанной на рис. 5. Представленная модель соответствует случаю, когда толщина пленки *por-Si* меньше глубины залегания *p-n*-перехода (образцы № 2 и № 3). Пленка *por-Si* состоит из приповерхностной области с наиболее мелкими кремниевыми кристаллитами (слой 1 на рис. 5) и внутренней области с более крупными кристаллитами (слой 2 на рис. 5). Исследование образцов, аналогичных № 2–4, методом токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней, проведенное в работе [5], показало, что даже при небольших длительностях процесса электрохимического травления (образцы № 2 и № 3) наблюдается трансформация дефектов с глубокими энергетическими уровнями.

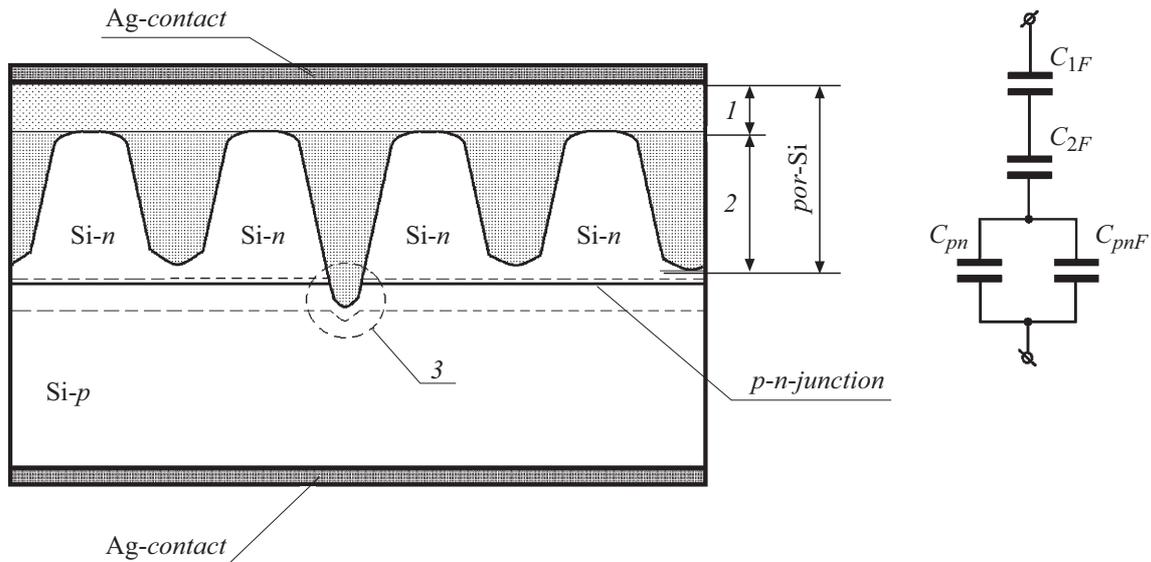


Рис. 5. Модель строения слоев исследуемой полупроводниковой структуры и емкостная эквивалентная схема замещения (на вставке): 1 — приповерхностный слой por-Si, содержащий наиболее мелкие кристаллиты, 2 — внутренний слой por-Si, 3 — прокол $p-n$ -перехода.

В [5] это объяснялось возникновением локальных проколов $p-n$ -перехода нижней границей формирующейся пленки por-Si. Таким образом, исследуемая полупроводниковая структура может содержать отдельные проколы $p-n$ -перехода (область 3 на рис. 5), приводящие к возникновению дефектов с глубокими энергетическими уровнями.

Особенности ВФХ исследуемой полупроводниковой структуры могут быть объяснены с помощью емкостной эквивалентной схемы замещения, показанной на вставке на рис. 5. Параллельное соединение емкостей C_{pn} и C_{pnF} определяет общую емкость $p-n$ -перехода исследуемой полупроводниковой структуры. Величина C_{pn} — составляющая емкости $p-n$ -перехода без учета влияния дефектов с глубокими энергетическими уровнями, не зависящая от частоты измерительного сигнала. При обратном смещении величина C_{pn} определяется барьерной емкостью $p-n$ -перехода. Составляющая емкости C_{pnF} определяется влиянием дефектов с глубокими энергетическими уровнями в области пространственного заряда $p-n$ -перехода, возникающими вследствие формирования пленки por-Si. Данная составляющая емкости зависит от частоты измерительного сигнала.

Последовательно соединенные емкости C_{1F} и C_{2F} определяют общую емкость поверхностной МДП-структуры, возникающей в результате формирования пленки por-Si (вставка на рис. 5). Величина C_{1F} является емкостью приповерхностного слоя por-Si (область 1 на рис. 5) и зависит от частоты измерительного сигнала, что обусловлено энергетическими уровнями ловушек на поверхности кремниевых кристаллитов. Исследование спектров фотолюминесценции показало, что с ростом длительности электрохимического травления толщина данного слоя por-Si возрастает, следовательно, вели-

чина C_{1F} при фиксированной частоте измерительного сигнала должна уменьшаться. Емкость C_{2F} определяется внутренним слоем por-Si, содержащим более крупные кремниевые кристаллиты (область 2 на рис. 5). Величина C_{2F} зависит от частоты, так как учитывает влияние состояний на поверхности кристаллитов. Так как увеличение длительности электрохимического травления приводит к росту толщины пленки por-Si, емкость C_{2F} при этом уменьшается.

В соответствии с емкостной эквивалентной схемой замещения (вставка на рис. 5) значение полной емкости исследуемой полупроводниковой структуры описывается выражением

$$C = [C_{1F}^{-1} + C_{2F}^{-1} + (C_{pn} + C_{pnF})^{-1}]^{-1}. \quad (1)$$

Наблюдаемые в настоящей работе особенности частотной зависимости ВФХ исследуемой полупроводниковой структуры можно объяснить на основе предложенной модели строения слоев (рис. 5) и формулы (1) следующим образом.

При высокой частоте измерительного сигнала (1 МГц) общая емкость поверхностной МДП-структуры, определяемая последовательным соединением C_{1F} и C_{2F} , оказывается меньше, чем общая емкость $p-n$ -перехода ($C_{pn} + C_{pnF}$). Вклад составляющей C_{pnF} при этом не проявляется, так как ловушки с глубокими энергетическими уровнями, имеющие длительные времена релаксации, не успевают следовать за измерительным сигналом. Вследствие указанной причины значения C_{1F} и C_{2F} при высокой частоте также имеют минимальные значения. Таким образом, на основании формулы (1) при высокой частоте измерительного сигнала наибольший вклад в общую

емкость вносит поверхностная МДП-структура (C_{1F} и C_{2F}). Рассмотренная ситуация характерна для образцов № 2–4.

При снижении частоты происходит рост составляющих емкости поверхностной МДП-структуры C_{1F} и C_{2F} за счет того, что ловушки на поверхности кремниевых кристаллитов успевают следовать за измерительным сигналом. Одновременно увеличивается общая емкость $p-n$ -перехода ($C_{pn} + C_{pnF}$) за счет роста составляющей C_{pnF} , которая определяется влиянием дефектов с глубокими энергетическими уровнями. Однако при небольших длительностях процесса электрохимического травления образуется меньше дефектов с глубокими уровнями в области пространственного заряда $p-n$ -перехода, поэтому вклад составляющей C_{pnF} относительно небольшой. Так как в этом случае общая емкость поверхностной МДП-структуры превышает емкость $p-n$ -перехода, то, согласно (1), результирующая ВФХ, главным образом, определяется влиянием барьерной емкости $p-n$ -перехода. Эта ситуация справедлива для образцов № 2 и № 3.

Исследование спектров фотолюминесценции образцов № 2–4 показало, что рост длительности процесса электрохимического травления приводит к увеличению толщины слоя 1 пленки por-Si (рис. 5). При этом также увеличивается толщина слоя 2 пленки por-Si (рис. 5). В результате значения емкостей C_{1F} и C_{2F} при фиксированной частоте измерительного сигнала снижаются. Также с увеличением длительности электрохимического травления происходит рост концентрации дефектов с глубокими уровнями в области пространственного заряда $p-n$ -перехода вследствие увеличения числа проколов нижним фронтом растущей пленки por-Si . Для образца № 4 внутренняя граница пленки por-Si лежит ниже плоскости $p-n$ -перехода. При этом $p-n$ -переход значительно поврежден. В этом случае, согласно формуле (1), наибольший вклад в ВФХ вносит емкость поверхностной МДП-структуры.

Снижение общей емкости полупроводниковой структуры при фиксированной частоте измерительного сигнала с ростом длительности процесса электрохимического травления для образцов № 2–4 (рис. 1–3) может быть связано с увеличением толщины слоев 1 и 2 пленки por-Si (рис. 5), приводящим к снижению емкостей C_{1F} и C_{2F} .

При прямом смещении поведение ВФХ исследуемой полупроводниковой структуры определяется, главным образом, влиянием ловушек с глубокими энергетическими уровнями на поверхности кремниевых кристаллитов в пленке por-Si .

Заключение

В результате проведенных исследований объяснены особенности частотной зависимости ВФХ полупроводниковой структуры, содержащей антиотражающую пленку por-Si над $p-n$ -переходом. Установлено, что

вид ВФХ в диапазоне частот измерительного сигнала 1 kHz–1 MHz определяется конкуренцией емкости $p-n$ -перехода и поверхностной МДП-структуры, возникающей в пленке por-Si вследствие неоднородности ее строения. Значительное влияние на ВФХ оказывают ловушки с глубокими уровнями на поверхности кремниевых кристаллитов и дефекты в области пространственного заряда $p-n$ -перехода, возникающие в ходе формирования пленки por-Si . Полученные результаты могут быть полезны при разработке фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии с антиотражающей пленкой por-Si и оптических датчиков.

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки РФ № 3.9506.2017/8.9 в Рязанском государственном университете им. С.А. Есенина.

Список литературы

- [1] Handbook of Porous Silicon / Ed. by L. Canham. Springer International Publishing, 2014. 1017 p.
- [2] Zheng J.P., Jiao K.L., Shen W.P. // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 61. P. 459–461.
- [3] Трегулов В.В. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 9. С. 153–154.
- [4] Трегулов В.В., Степанов В.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 11. С. 91–94.
- [5] Трегулов В.В., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 21. С. 3–9.
- [6] Венгер Е.Ф., Горбач Т.Я., Кириллова С.И., Примаченко В.Е., Чернобай В.А. // ФТП. 2002. Т. 36. Вып. 3. С. 349–354.
- [7] Горячев Д.Н., Беляков Л.В., Сресели О.М. // ФТП. 2004. Т. 38. Вып. 6. С. 739–744.
- [8] Мельник Н.Н., Трегулов В.В. // КСФ. 2015. Т. 42. Вып. 3. С. 19–24.
- [9] Горячев Д.Н., Беляков Л.В., Сресели О.М. // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 4. С. 494–498.
- [10] Евтух А.А., Каганович Э.Б., Манойлов Э.Г., Семенов Н.А. // ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 2. С. 180–184.