

Механизмы токопрохождения в полупроводниковой структуре фотоэлектрического преобразователя с $n^+ - p$ -переходом и антиотражающей пленкой пористого кремния, сформированной методом окрашивающего травления

© В.В. Трегулов,¹ В.Г. Литвинов,² А.В. Ермачихин²

¹ Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина, 390000 Рязань, Россия

² Рязанский государственный радиотехнический университет, 390005 Рязань, Россия
e-mail: trww@yandex.ru

Поступило в Редакцию 18 июня 2018 г.

В окончательной редакции 25 сентября 2018 г.

Принято к публикации 10 октября 2018 г.

Исследованы экспериментальные образцы фотоэлектрических преобразователей с $n^+ - p$ -переходом на основе монокристаллического кремния и антиотражающей пленкой пористого кремния, сформированной методом окрашивающего химического травления в травителе $\text{HF}:\text{KMnO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Показано, что при концентрациях окислителя KMnO_4 0.025 и 0.040 М длительность роста пленки пористого кремния, при которой достигается наибольшая эффективность фотоэлектрического преобразователя, может быть существенно увеличена по сравнению с методом анодного электрохимического травления. Для исследования механизмов токопрохождения измерялась температурная зависимость прямых и обратных ветвей вольт-амперных характеристик. Обнаружено наличие нескольких механизмов токопрохождения. Установлено, что на процессы токопрохождения существенное влияние оказывают ловушки, с энергиями активации, распределенными в непрерывном диапазоне значений.

DOI: 10.21883/JTF.2019.05.47477.237-18

Введение

Эффективность кремниевого фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии на основе $p - n$ -перехода может быть существенно повышена за счет применения антиотражающей пленки пористого кремния (por-Si). В настоящее время наиболее популярный способ изготовления таких преобразователей заключается в формировании пленки por-Si на фронтальной поверхности после создания $p - n$ -перехода с малой глубиной залегания [1]. Для формирования пленки por-Si в таких структурах наибольшее распространение получил метод анодного электрохимического травления в электролите, состоящем из HF , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ и H_2O . При плотности тока электрохимического травления 15–35 mA/cm^2 длительность процесса не должна превышать 15–20 с, чтобы растущая пленка por-Si не повредила плоскость $p - n$ -перехода, типичная глубина залегания которого для фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии составляет 300–800 nm [1]. Прокол $p - n$ -перехода может привести к возникновению дефектов с глубокими энергетическими уровнями в области пространственного заряда и снижению эффективности фотоэлектрического преобразователя [2]. Столь малые времена процесса формирования пленки por-Si могут усложнить организацию технологического процесса изготовления антиотражающего покрытия фотоэлектрического преобразова-

теля. В условиях производства это может привести к значительному разбросу основных характеристик выпускаемых фотоэлектрических преобразователей. В связи с этим актуальна задача управляемого снижения скорости роста пленки por-Si. Для решения данной проблемы может быть использован метод окрашивающего химического травления при формировании por-Si. Особенности данного метода заключаются в отсутствии внешнего источника тока и применении травителя, содержащего наряду с HF раствор сильного окислителя, например HNO_3 , KNO_2 и т.п. [3]. В ряде работ, например [4,5], отмечается, что скорость роста por-Si при окрашивающем травлении заметно меньше, чем при электрохимическом. Это значительно облегчает задачу получения более тонких пленок. Скорость роста пленки por-Si при окрашивающем травлении зависит от химической природы окислителя и его концентрации [3].

Важно отметить, что для формирования тонких пленок por-Si на фронтальной поверхности фотоэлектрического преобразователя с $p - n$ -переходом метод окрашивающего травления используется намного реже, чем анодное электрохимическое травление [1]. В работе [6] антиотражающая пленка por-Si формируется химическим окрашивающим травлением в растворе $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$ на поверхности n^+ -области $n^+ - p$ -перехода с глубиной залегания 0.6 μm . Длительность процесса травления составила 20 с. В ра-

боте [7] для роста тонкой пленки por-Si на аналогичной полупроводниковой структуре используют травитель $\text{HF:H}_2\text{O}_2:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Травление проводят в течение 3–7 с. В [6,7] длительность травления подбирается таким образом, чтобы толщина пленки por-Si была меньше глубины залегания p - n -перехода. Таким образом, в обоих отмеченных случаях и при применении анодного электрохимического травления длительности процесса формирования пленки por-Si имеют близкие значения. В связи с этим актуальной задачей является подбор окислителя, который позволит существенно снизить скорость роста пленки por-Si .

В настоящей работе исследуются полупроводниковые структуры фотоэлектрических преобразователей с n^+ - p -переходом и антиотражающей пленкой por-Si , сформированной методом окрашивающего химического травления в травителе на основе HF и $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ с добавкой окислителя KMnO_4 .

Основной задачей работы является подбор концентрации раствора окислителя KMnO_4 с целью увеличения времени формирования пленки por-Si (по сравнению с методом анодного электрохимического травления), при котором достигается наиболее высокая эффективность фотоэлектрического преобразователя. Другой важной задачей является исследование механизмов токопрохождения в изготовленных полупроводниковых структурах.

Описание образцов и методики исследования

В качестве подложек для изготовления экспериментальных образцов использовались кремниевые монокристаллические пластины p -типа проводимости с удельным сопротивлением $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и ориентацией поверхности (100). Подложки подвергались жидкостному химическому травлению в водном растворе KOH . После травления формировался n^+ - p -переход с глубиной залегания не более $0.5 \mu\text{м}$ с помощью термической диффузии фосфора при температуре 1100°C в течение 10 мин. Пленка por-Si формировалась на поверхности n^+ -слоя методом химического окрашивающего травления. Использовался травитель состава $\text{HF:KMnO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (соотношение 1:0.5:1). Окислитель KMnO_4 вводился в состав травителя в виде водного раствора. Исследуемые образцы изготавливались при значениях концентрации водного раствора KMnO_4 0.025, 0.040 и 0.050 М. Для каждого значения концентрации раствора KMnO_4 было изготовлено 5 образцов при следующих длительностях процесса травления t_{et} : 0.5, 1, 2, 3, 5 мин. 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 ФС-1127 (ОАО „Монокристалл“, Россия), применяемая при изготовлении фронтальных контактов кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечного излучения.

С целью изучения механизмов токопрохождения проводились измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) при прямом и обратном смещении, без освещения образцов, в диапазоне температур $T = 80\text{--}370 \text{ К}$ с шагом 10 К. Прямому смещению соответствует отрицательный потенциал на металлическом контакте к пленке por-Si . Для измерений использовалась экспериментальная установка на базе гелиевого криостата замкнутого типа Janis CCS 400/204N и электрометра Keithley-6517B со встроенным источником постоянного напряжения. Для определения эффективности преобразования солнечного излучения η проводились измерения ВАХ фотоэлектрического преобразователя (при $T = 300 \text{ К}$) на специализированной экспериментальной установке при режиме освещения образцов АМ 1.5 [2]. Величина η определялась по формуле

$$\eta = \frac{FFJ_{SC}U_{OC}}{P_{in}}, \quad (1)$$

где FF — фактор заполнения, J_{SC} — плотность тока короткого замыкания, U_{OC} — напряжение холостого хода, P_{in} — плотность мощности падающего излучения [2].

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1 представлен график зависимости величины η от t_{et} при различных значениях концентрации раствора KMnO_4 в составе травителя. Для концентраций раствора KMnO_4 0.025 и 0.040 М с увеличением t_{et} от 0.5 до 1 мин наблюдается небольшой рост величины η . Это может быть связано со снижением потерь на отражение света от фронтальной поверхности за счет увеличения толщины слоя por-Si . Резкое снижение η при увеличении t_{et}

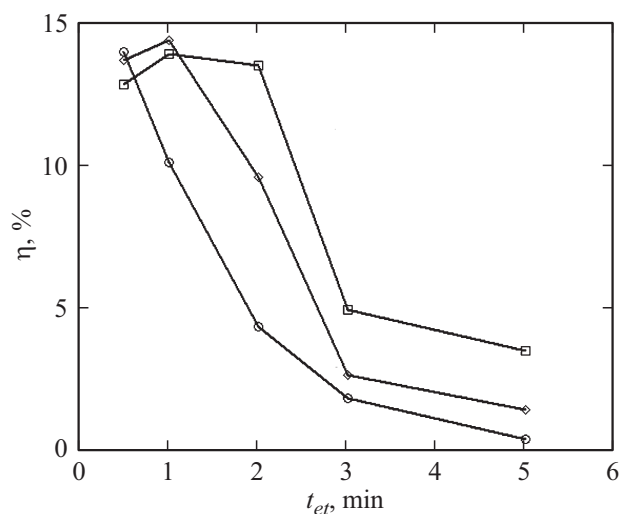


Рис. 1. Зависимость эффективности фотоэлектрического преобразователя от времени травления при различных значениях концентрации раствора KMnO_4 в составе травителя: \square — 0.025, \diamond — 0.040, \circ — 0.050 М.

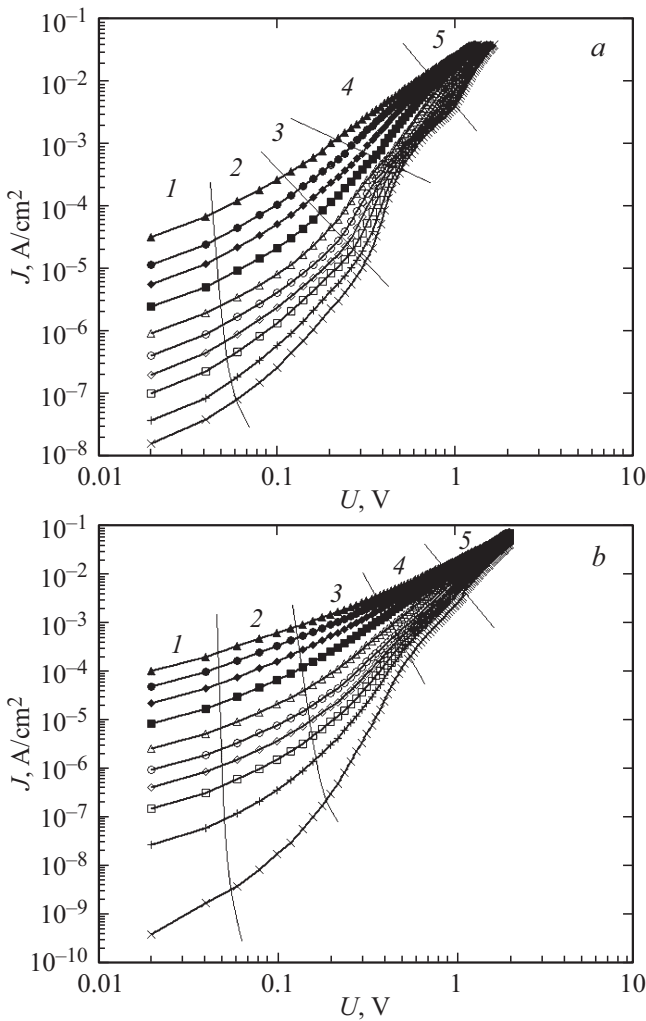


Рис. 2. Прямые ветви ВАХ при температуре T , К: \times — 80, $+$ — 110, \square — 140, \diamond — 170, \circ — 200, \triangle — \blacksquare — 280, \blacklozenge — 310, \bullet — 350, \blacktriangle — 370; a — для образцов первой группы, b — для образцов второй группы.

от 2 до 3 min для концентрации раствора KMnO_4 0.025 M, а также при увеличении t_{et} от 1 до 3 min для концентрации 0.040 M может объясняться повреждением плоскости p - n -перехода нижней границей пленки roq-Si . Для концентрации раствора KMnO_4 0.050 M резкое снижение η имеет место при увеличении t_{et} от 0.5 до 3 min. В диапазоне t_{et} от 3 до 5 min для всех значений концентрации раствора KMnO_4 темп снижения величины η существенно замедляется (рис. 1). Это может быть объяснено снижением скорости роста пленки roq-Si .

По характеру температурных зависимостей ВАХ исследуемые образцы можно разделить на две группы. К первой группе можно отнести образцы, изготовленные при значениях $t_{et} = 0.5$ –2 min для концентраций раствора KMnO_4 0.025 и 0.040 M, а также образцы, изготовленные при $t_{et} = 0.5$ min и $t_{et} = 1$ min при концентрации 0.050 M. Остальные образцы по характеру

температурной зависимости ВАХ относятся ко второй группе.

На рис. 2 представлены прямые ветви ВАХ в виде зависимости плотности тока J от приложенного постоянного напряжения U в двойном логарифмическом масштабе, измеренные в диапазоне температур 80–370 K. На рис. 2, a показаны прямые ветви ВАХ-образца, изготовленного при концентрации раствора KMnO_4 0.025 M и $t_{et} = 0.5$ min. Для всех образцов первой группы прямые ветви ВАХ выглядят аналогично рис. 2, a . На рис. 2, b представлены прямые ветви ВАХ-образца, изготовленного при концентрации раствора KMnO_4 0.025 M и $t_{et} = 3$ min, относящегося ко второй группе. Остальные образцы данной группы имеют аналогичный вид прямых ветвей ВАХ.

Прямые ветви ВАХ образцов обеих групп (рис. 2) могут быть разделены на пять участков, в пределах которых они приблизительно аппроксимируются отрезками прямых, и могут быть представлены степенной зависимостью

$$J \propto U^m, \tag{2}$$

где m — показатель степени, характеризующий наклон соответствующего участка [8]. Выражение (2) обычно используется для описания процессов токопрохождения в полупроводниковых структурах в рамках модели токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ) [8].

На участке 1 прямых ветвей ВАХ (рис. 2) образцов первой группы во всем исследуемом диапазоне температур выполняется условие $1 < m < 2$. С точки зрения модели ТОПЗ это означает, что концентрация инжектированных носителей заряда становится сравнимой с концентрацией термически генерированных носителей [8]. Для образцов второй группы на данном участке прямых ветвей ВАХ условие $1 < m < 2$ выполняется в области низких температур (до $T = 100$ –120 K для разных образцов в пределах группы). При более высоких температурах $m = 1$, следовательно, согласно модели ТОПЗ, на данном участке прямых ветвей ВАХ концентрация инжектированных носителей меньше, чем концентрация термически генерированных носителей [8].

Участок 2 прямых ветвей ВАХ (рис. 2) образцов обеих групп во всем исследованном диапазоне температур может быть описан известным выражением для p - n -перехода:

$$J \propto \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right], \tag{3}$$

где q — элементарный заряд, n — показатель неидеальности p - n -перехода, k — постоянная Больцмана [2]. Для образцов первой группы при $T = 80$ –240 K $n \geq 2$ с дальнейшим увеличением T до 260–290 K (для разных образцов в пределах группы) величина n плавно снижается до 1.5, следовательно, согласно [2], в данных условиях механизм токопрохождения определяется рекомбинацией носителей в области пространственного заряда p - n -перехода. При более высоких температурах

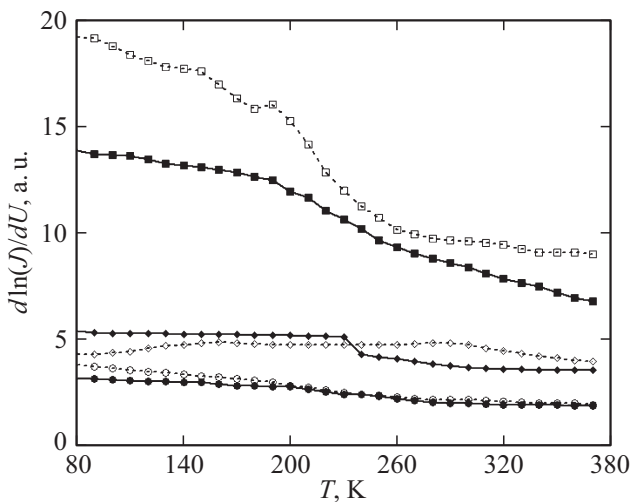


Рис. 3. Зависимость величины $d \ln(J)/dU$ от температуры при прямом смещении для образцов первой группы (\square , \diamond , \circ , пунктирная линия) и второй группы (\blacksquare , \blacklozenge , \bullet , сплошная линия) для значений U , V: \square — 0.3, \diamond — 0.7, \circ — 1.1, \blacksquare — 0.3, \blacklozenge — 0.7, \bullet — 1.1.

для образцов первой группы $n = 1.3 \pm 0.1$, следовательно, в данном диапазоне температур токопрохождение преимущественно определяется диффузией носителей в области пространственного заряда p - n -перехода. Для образцов второй группы в диапазоне температур 80–370 К минимальное значение величины n составляет 1.7, следовательно, участок 2 прямых ветвей ВАХ определяется механизмом токопрохождения, связанным с рекомбинацией носителей.

На участках 3–5 прямых ветвей ВАХ (рис. 2) образцов обеих групп выполняется условие $m > 2$, что с точки зрения модели ТОПЗ свидетельствует о влиянии на процессы токопрохождения ловушек с экспоненциальным распределением по энергии активации [8]. Разные наклоны участков 3–5 могут свидетельствовать о том, что токопрохождение в исследуемой структуре определяется процессами перезарядки нескольких групп ловушек с отличающимися энергиями активации.

С целью уточнения механизмов токопрохождения на участках 3–5 прямых ветвей ВАХ для образцов первой и второй группы были построены графики зависимости $d \ln(J)/dU = f(T)$ (рис. 3). Кривые, представленные на рис. 3, соответствуют различным участкам прямых ветвей ВАХ (рис. 2): участку 3 соответствует кривая, измеренная при $U = 0.3$ В, участку 4 — кривая при $U = 0.7$ В, участку 5 — кривая при $U = 1.1$ В. Фрагменты кривых на рис. 3 с наиболее слабой зависимостью $d \ln(J)/dU = f(T)$ свидетельствуют о наличии туннельного механизма токопрохождения в исследуемом образце [9]. Туннелирование носителей заряда может происходить внутри пленки por-Si между энергетическими уровнями ловушек на поверхности кремниевых кристаллитов через барьеры SiO_x [10].

Для образцов обеих групп при $U = 0.3$ В величина $d \ln(J)/dU$ достаточно сильно зависит от температуры. Следовательно, на участке 3 прямых ветвей ВАХ (рис. 2) токопрохождение определяется главным образом моделью ТОПЗ, а туннелирование носителей заметно не проявляется. При $U = 0.7$ – 1.1 В кривые на рис. 3 содержат отдельные области, в пределах которых $d \ln(J)/dU$ практически не зависит от температуры. Наличие нескольких участков со слабой зависимостью $d \ln(J)/dU = f(T)$ на одной кривой может свидетельствовать о нескольких процессах туннелирования, протекающих с участием разных групп ловушек с различными энергиями активации [9].

Важным отличием прямых ветвей ВАХ образцов первой и второй группы является различный характер участков 4 и 5 (рис. 2). Для образцов первой группы участки 4 и 5 во всем исследуемом диапазоне температур имеют разный наклон (рис. 2, а). Для образцов второй группы наклон участков 4 и 5 совпадает при $T = 80$ – 170 и 280 – 370 К (рис. 2, б). Различие наклона прямых ветвей ВАХ может объясняться тем, что в пределах указанных участков процессы туннелирования носителей протекают с участием разных групп ловушек с различными энергиями активации. Совпадение наклонов прямых ветвей ВАХ на участках 4 и 5 может свидетельствовать о том, что туннелирование протекает с участием одних и тех же ловушек (с одинаковыми энергиями активации).

Таким образом, туннельный механизм токопрохождения имеет место для образцов обеих групп на участках 4 и 5 прямых ветвей ВАХ (рис. 2). В образцах второй группы туннельный механизм токопрохождения выражен более сильно, так как кривые при $U = 0.7$ – 1.1 В на рис. 3 имеют больше участков, в пределах которых $d \ln(J)/dU$ практически не зависит от температуры.

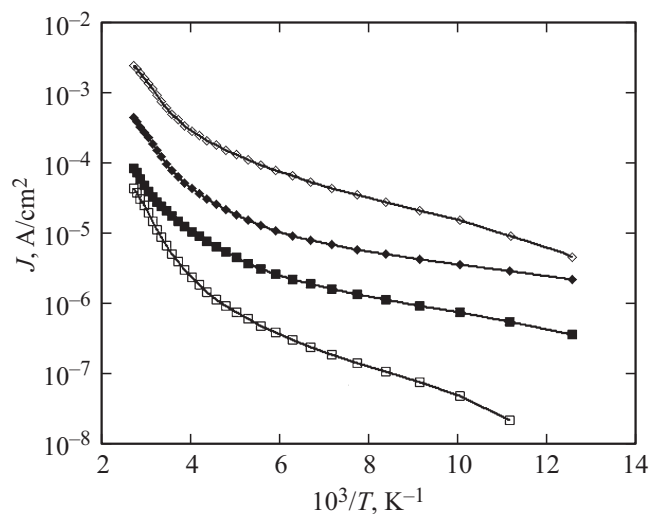


Рис. 4. Зависимость плотности тока от температуры при прямом смещении для значений U , V: \square — 0.03, \diamond — 0.3 и обратном смещении для значений U , V: \blacksquare — 3, \blacklozenge — 7.

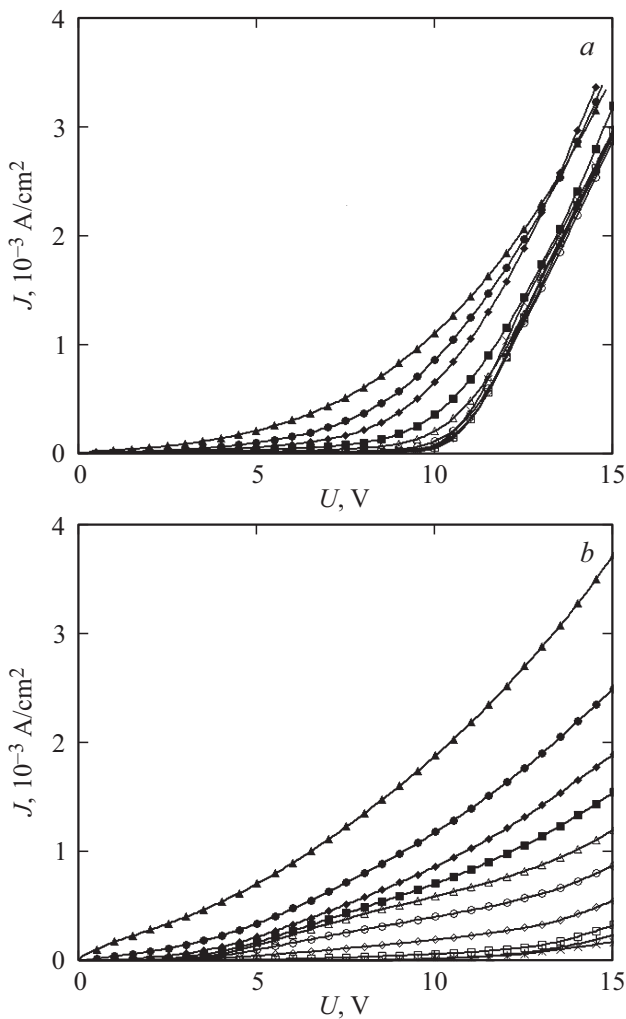


Рис. 5. Обратные ветви ВАХ при температуре T , К: \times — 80, $+$ — 110, \square — 140, \diamond — 170, \circ — 200, \triangle — 240, \blacksquare — 280, \blacklozenge — 310, \bullet — 350, \blacktriangle — 370; a — для образцов первой группы, b — для образцов второй группы.

На рис. 4 приведена температурная зависимость плотности тока при различных напряжениях прямого смещения для образца первой группы, изготовленного при концентрации раствора KMnO_4 0.025 М и $t_{et} = 0.5$ min. Кривые температурной зависимости для всех образцов, относящихся к обеим группам, имеют одинаковый вид. Графики на рис. 4 имеют вид гладких кривых, следовательно, процессы токопрохождения контролируются ловушками, энергия активации которых занимает непрерывный диапазон значений. Для образцов первой группы при $U = 0.03$ В энергия активации ловушек изменяется от 0.272 ± 0.005 до 0.053 ± 0.017 eV. Здесь и далее указаны усредненное значение энергий активации и ее среднеквадратическое отклонение в пределах соответствующей группы образцов. При $U = 0.3$ В энергия активации ловушек изменяется от 0.158 ± 0.020 до 0.029 ± 0.016 eV. Для второй группы образцов при $U = 0.03$ В пределы изменения энергии

активации составляют 0.242 ± 0.011 и 0.058 ± 0.037 eV, при $U = 0.3$ В — 0.146 ± 0.039 и 0.029 ± 0.008 eV соответственно. Значительное снижение энергии активации с ростом U для образцов обеих групп может быть объяснено особенностью пространственного распределения ловушек. Близкие значения энергий активации ловушек для образцов обеих групп при одинаковых значениях U свидетельствуют о том, что механизмы токопрохождения при прямом смещении контролируются одними и теми же группами ловушек.

Обратные ветви ВАХ при различных температурах, типичные для образцов первой и второй групп, представлены на рис. 5 в линейном масштабе. Температурные зависимости прямых и обратных ветвей ВАХ измерялись на одних и тех же образцах.

Для образцов первой группы обратные ветви ВАХ во всем исследованном диапазоне температур имеют достаточно четко выраженный участок пробоя (рис. 5, a). Для всех образцов данной группы характерно увеличение наклона обратных ветвей ВАХ (рис. 5, a) в предпробойной области (0–7 В), особенно заметное в диапазоне температур 310–370 К. Наблюдаемую ситуацию можно объяснить возрастанием вклада генерационных процессов при перезарядке энергетических уровней ловушек [2,11].

На рис. 6 представлена температурная зависимость напряжения пробоя U_b для образца, изготовленного при концентрации раствора KMnO_4 0.025 М и $t_{et} = 0.5$ min, относящегося к первой группе. Остальные образцы данной группы имеют аналогичный характер зависимости $U_b = f(T)$. Для образцов первой группы в области температур от 80 до 260–300 К (для разных образцов в пределах группы) U_b слабо зависит от температуры. В области более высоких температур U_b резко снижается (рис. 6). Снижение величины U_b с ростом температуры может объясняться усилением генерационных процессов

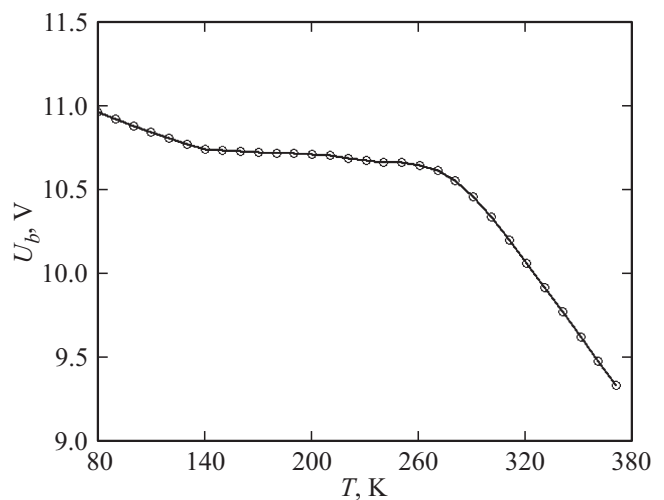


Рис. 6. Зависимость напряжения пробоя от температуры для образца первой группы, изготовленного при концентрации раствора KMnO_4 в составе травителя 0.025 М и $t_{et} = 0.5$ min.

в области пространственного заряда p – n -перехода при участии ловушек [2,11].

Для образцов второй группы при обратном смещении во всем исследованном диапазоне температур ветви ВАХ имеют вид кривых с плавно изменяющимся наклоном (рис. 5, *b*), что характерно для так называемого „мягкого“ пробоя. Это может быть объяснено лавинным пробоем с участием ловушек, энергия активации которых занимает непрерывный диапазон значений [11].

Температурная зависимость плотности тока при различных напряжениях обратного смещения показана на рис. 4. Представленные графики, так же как и при прямом смещении, имеют одинаковый вид для всех образцов, относящихся к обеим группам. Гладкий вид кривых $J = f(T)$ при обратном смещении свидетельствует о том, что на процессы токопрохождения оказывают влияние ловушки с энергиями активации, занимающими непрерывный диапазон значений. Для образцов первой группы при $U = 3$ В энергия активации ловушек изменяется от 0.243 ± 0.018 до 0.022 ± 0.005 эВ. При $U = 7$ В энергия активации ловушек изменяется от 0.197 ± 0.010 до 0.016 ± 0.004 эВ. Для второй группы образцов при $U = 3$ В пределы изменения энергии активации составляют 0.308 ± 0.064 и 0.052 ± 0.019 эВ, при $U = 7$ В — 0.241 ± 0.062 и 0.024 ± 0.009 эВ соответственно. Снижение энергии активации для образцов обеих групп с ростом U , как и при прямом смещении, может быть объяснено особенностью пространственного распределения ловушек.

Выводы по результатам эксперимента

Формирование антиотражающей пленки por-Si окрашивающим травлением в травителе состава $\text{HF:KMnO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (соотношение 1:0.5:1) при концентрациях окислителя (водного раствора KMnO_4) 0.025 и 0.040 М приводит к тому, что эффективность изготавливаемых фотоэлектрических преобразователей имеет наиболее высокое значение при $t_{et} = 0.5$ – 2.0 и 0.5 – 1.0 мин соответственно (рис. 1). В то же время при анодном электрохимическом травлении наиболее высокое качество подобных фотоэлектрических преобразователей достигается при t_{et} не более 20 с [1]. Таким образом, применение окрашивающего травления в указанных технологических режимах для формирования антиотражающей пленки por-Si позволяет существенно увеличить диапазон значений t_{et} , при которых достигается наиболее высокая эффективность фотоэлектрических преобразователей. В условиях производства это должно привести к снижению разброса основных характеристик выпускаемых фотоэлектрических преобразователей. При увеличении концентрации окислителя до 0.050 М в составе травителя резкое снижение эффективности преобразования происходит при $t_{et} > 0.5$ мин. В этом случае достоинства технологии окрашивающего травления с применением

травителя $\text{HF:KMnO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ по сравнению с электрохимическим методом не проявляются столь значительно.

Механизмы токопрохождения в полупроводниковых структурах, исследованных в настоящей работе, и в аналогичных образцах с антиотражающей пленкой por-Si , изготовленной анодным электрохимическим травлением [12], имеют близкий характер.

В прямом смещении при малых напряжениях (0.07–0.20 В) происходит перенос носителей через область пространственного заряда p – n -перехода, обусловленный главным образом рекомбинацией носителей с участием ловушек. В то же время для образцов первой группы, исследованных в настоящей работе, в диапазоне температур от 260–290 (для разных образцов в пределах группы) до 370 К перенос носителей через область пространственного заряда p – n -перехода обусловлен диффузионным процессом. Для образцов с пленкой por-Si , изготовленной электрохимическим травлением, во всем исследованном диапазоне температур перенос носителей заряда через область пространственного заряда p – n -перехода был обусловлен процессами рекомбинации с участием ловушек [12].

На участках 1 и 3 прямых ветвей ВАХ токопрохождение определяется моделью ТОПЗ.

В области $U > 0.6$ В напряжение в основном приложено к por-Si и проявляется туннельный механизм токопрохождения внутри пленки por-Si между энергетическими уровнями ловушек на поверхности кремниевых кристаллитов через барьеры SiO_x [10]. В аналогичных образцах, где пленка por-Si формировалась анодным электрохимическим травлением [12] в области высоких напряжений прямого смещения, также наблюдается туннелирование носителей.

При обратном смещении на процессы токопрохождения заметное влияние оказывают генерационные процессы в области пространственного заряда p – n -перехода с участием ловушек. Для образцов первой группы это проявляется в увеличении наклона обратных ветвей ВАХ в предпробойной области (0–7 В), особенно заметное в диапазоне температур 310–370 К, а также в резком снижении величины напряжения пробоя в области высоких температур. Для образцов второй группы влияние генерационных процессов с участием ловушек проявляется более сильно, в результате чего обратные ветви ВАХ во всем исследованном диапазоне температур имеют вид, характерный для так называемого „мягкого“ пробоя.

В то же время для образцов первой группы обратные ветви ВАХ во всем исследованном диапазоне температур имеют достаточно четко выраженный участок пробоя (рис. 5, *a*).

На процессы токопрохождения при прямом и обратном смещениях оказывают влияние ловушки с энергиями активации, распределенными в непрерывном диапазоне значений. Такая же ситуация отмечалась в аналогичных полупроводниковых структурах, где пленка por-Si формировалась анодным электрохимическим травлением [12].

По характеру прямых и обратных ветвей ВАХ образцы второй группы, исследованные в настоящей работе наиболее близки к аналогичным образцам с пленкой por-Si , изготовленной электрохимическим травлением, исследованным в [12].

Заключение

Применение окрашивающего химического травления для формирования антиотражающей пленки por-Si в травителе состава $\text{HF:KMnO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (соотношение 1:1:1) при концентрациях окислителя (водного раствора KMnO_4) 0.025 и 0.040 М приводит к значительному увеличению времени t_{et} , при котором достигается наиболее высокая эффективность фотоэлектрических преобразователей. В связи с этим применение окрашивающего травления при изготовлении фотоэлектрических преобразователей с $p-n$ -переходом на основе кремния может быть более предпочтительным по сравнению с анодным электрохимическим травлением.

Механизмы токопрохождения в полупроводниковых структурах, исследованных в настоящей работе, и в аналогичных образцах, где антиотражающая пленка por-Si формировалась методом анодного электрохимического травления, в целом идентичны. При прямом смещении имеют место следующие механизмы токопрохождения: перенос носителей через область пространственного заряда $p-n$ -перехода, обусловленный главным образом рекомбинацией с участием ловушек, ТОПЗ, а также туннелирование носителей заряда внутри пленки por-Si между энергетическими уровнями ловушек на поверхности кремниевых кристаллитов через барьеры SiO_x . При обратном смещении на токопрохождение значительное влияние оказывают генерационные процессы в области пространственного заряда $p-n$ -перехода с участием ловушек.

Полученные результаты могут быть полезными при разработке фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии и оптических датчиков на основе $p-n$ -перехода с антиотражающей пленкой por-Si .

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 3.9506.2017/8.9 в Рязанском государственном университете им. С.А. Есенина. Работа выполнена на оборудовании Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) при Рязанском государственном радиотехническом университете.

Список литературы

- [1] Handbook of Porous Silicon / Ed. by L. Canham. Springer International Publishing, 2014. 1017 p.
- [2] Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. 456 с.
- [3] Горячев Д.Н., Беляков Л.В., Сресели О.М. // ФТП. 2000. Т. 34. Вып. 9. С. 1130–1134.

- [4] Каганович Э.Б., Манойлов Э.Г., Свечников С.В. // ФТП. 1999. Т. 33. Вып. 3. С. 327–331.
- [5] Венгер Е.Ф., Голиней Р.Ю., Матвеева Л.А., Васин А.В. // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 1. С. 104–109.
- [6] Chaoui R., Messaoud A. // Desalination. 2007. Vol. 209. P. 118–121.
- [7] Chaoui R., Mahmoudi B., Si Ahmed Y. // Revue des Energies Renouvelables. 2013. Vol. 16. N 2. P. 347–356.
- [8] Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. 416 с.
- [9] Шарма Б.Л. Полупроводниковые гетеропереходы. М.: Сов. радио, 1979. 232 с.
- [10] Евтух А.А., Каганович Э.Б., Манойлов Э.Г., Семенов Н.А. // ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 2. С. 180–184.
- [11] Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1987. 479 с.
- [12] Трегулов В.В., Степанов В.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 11. С. 91–94.