

07

Особенности механизмов токопрохождения в полупроводниковой структуре фотоэлектрического преобразователя с $n^+ - p$ -переходом и антиотражающей пленкой пористого кремния

© В.В. Трегулов,¹ В.А. Степанов,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 5 апреля 2016 г.)

Исследована температурная зависимость прямых и обратных ветвей вольт-амперной характеристики полупроводниковой структуры фотоэлектрического преобразователя с $n^+ - p$ -переходом на основе монокристаллического кремния и антиотражающей пленкой пористого кремния на фронтальной поверхности. Обнаружено наличие нескольких механизмов токопрохождения. Установлено, что на процессы токопрохождения в исследуемой полупроводниковой структуре существенное влияние оказывают ловушки, возникающие при формировании пленки пористого кремния.

Введение

Применение пленки пористого кремния (por-Si) в качестве антиотражающего покрытия фронтальной поверхности фотоэлектрического преобразователя на основе $p - n$ -перехода позволяет существенно повысить эффективность преобразования солнечной энергии [1]. Обычно при изучении подобных полупроводниковых структур основное внимание уделяется исследованию морфологии пленок por-Si и спектров отражения фронтальной поверхности [2,3]. В то же время мало внимания уделяется исследованию особенностей электрофизических процессов. Наличие пленки por-Si над $p - n$ -переходом оказывает заметное влияние на электрофизические характеристики полупроводниковой структуры. Так, например, в нашей работе [4] было показано, что вид высокочастотной вольт-фарадной характеристики полупроводниковой структуры, состоящей из кремниевого $n^+ - p$ -диода и пленки por-Si на поверхности n^+ -области, не соответствует указанной характеристике исходного $n^+ - p$ -перехода, что объясняется влиянием структуры металл-диэлектрик-полупроводник, которая формируется на поверхности n^+ -области в ходе электрохимического травления. В качестве диэлектрического слоя выступает поверхностный слой por-Si, состоящий из кремниевых кристаллитов и окислов кремния SiO_x .

Целью настоящей работы является изучение механизмов токопрохождения в полупроводниковой структуре на основе $n^+ - p$ -перехода с тонкой пленкой por-Si на внешней поверхности n^+ -области, предназначенной для применения в качестве фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии.

Описание образцов и методики исследования

Полупроводниковая структура, исследуемая в настоящей работе, аналогична образцам, изучавшимся в [4]. Основной исследуемой структурой является $n^+ - p$ -переход, сформированный диффузией фосфора на кремниевой монокристаллической подложке p -типа проводимости с ориентацией поверхности (100) и удельным сопротивлением $1 \Omega \cdot \text{cm}$. Глубина залегания $n^+ - p$ -перехода составляет $0.5 \mu\text{m}$. Пленка por-Si выращивалась на поверхности n^+ -слоя методом анодного электрохимического травления в электролите, состоящем из смеси HF и $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ в соотношении 1 : 1. Электрохимическое травление производилось в гальваностатическом режиме при плотности тока 18 mA/cm^2 . Толщина пленки por-Si исследуемой полупроводниковой структуры не превышала глубины залегания $n^+ - p$ -перехода. Для проведения электрических измерений к p -области структуры и на поверхности por-Si формировались индиевые омические контакты.

С целью изучения механизмов токопрохождения проводились измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) в прямом и обратном смещениях в диапазоне температур 80–300 К с шагом 10 К. Для измерений использовалась экспериментальная установка на базе гелиевого криостата замкнутого типа Janis CCS 400/204N и электрометра Keithley-6517B со встроенным источником постоянного напряжения.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Измеренные ВАХ во всем исследуемом диапазоне температур имеют выпрямляющий характер. Прямое

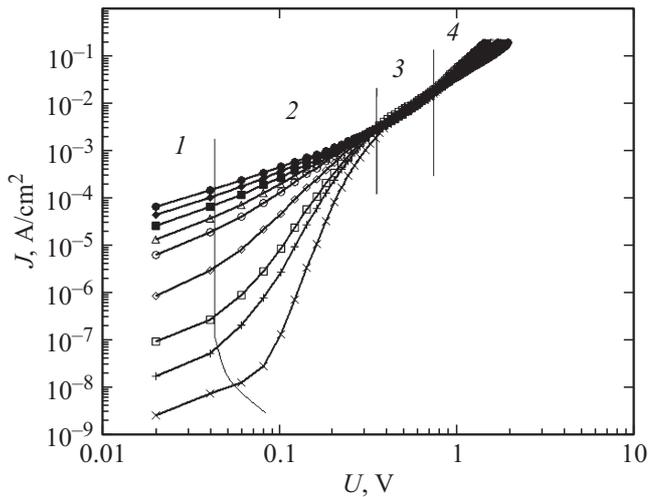


Рис. 1. Прямые ветви ВАХ при температуре T , К: \times — 80, $+$ — 120, \square — 140, \diamond — 180, \circ — 220, \triangle — 240, \blacksquare — 260, \blacklozenge — 280, \bullet — 300.

включение соответствует отрицательному потенциалу на металлическом контакте к пленке por-Si .

На рис. 1 представлены прямые ветви ВАХ при различных температурах в виде зависимости плотности тока J от приложенного постоянного напряжения U в двойном логарифмическом масштабе.

Прямые ветви ВАХ могут быть разделены на четыре участка (рис. 1), в пределах которых они приблизительно аппроксимируются отрезками прямых и могут быть представлены степенной зависимостью

$$J \propto U^m, \quad (1)$$

где m — показатель степени, характеризующий наклон соответствующего участка [5].

На участке 1 прямых ветвей ВАХ (рис. 1), в диапазоне температур 80–300 К выполняется закон Ома ($m = 1.00 \pm 0.06$). Эта ситуация может быть объяснена в рамках классической модели токов, ограниченных пространственным зарядом и свидетельствует о том, что концентрация инжектированных носителей заряда меньше концентрации термически генерированных носителей [5].

На участке 2 (рис. 1) прямые ветви ВАХ в диапазоне температур 80–300 К могут быть описаны известным выражением для p - n -перехода:

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

где q — элементарный заряд, n — показатель неидеальности p - n -перехода, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура [6]. Величина n в диапазоне температур 80–300 К изменяется в пределах 1.6–1.9. Следовательно, согласно [6], на данном участке ВАХ преобладает механизм токопрохождения, связанный с

рекомбинацией носителей в области пространственного заряда n^+ - p -перехода.

В диапазоне напряжений 0.4–0.8 В (участок 3 на рис. 1) величина $d \ln(J)/dU$ слабо зависит от температуры, что, согласно [7], характерно для туннельного механизма токопрохождения. Температурная зависимость $d \ln(J)/dU$ при различных значениях U приведена на рис. 2. При $U = 0.4$ В величина слабо зависит от T при температурах 190–300 К. При напряжениях 0.5–0.7 В указанная особенность отмечается в диапазоне температур 80–300 К. С ростом величины U до 0.8 В данная особенность наблюдается при температурах 80–180 К. Таким образом, на участке 3 прямых ветвей ВАХ (рис. 1) преобладает туннельный механизм токопрохождения в пленке por-Si . Туннелирование носителей заряда может происходить внутри пленки por-Si между энергетическими уровнями ловушек на поверхности кремниевых кристаллитов через барьеры SiO_x . В работе [8] отмечалось, что такой процесс характерен для полупроводниковых структур, содержащих пленки por-Si на поверхности монокристаллического кремния.

При $U > 0.8$ В (рис. 2) зависимость $d \ln(J)/dU$ от T усиливается, что может быть связано с процессами перезарядки энергетических уровней ловушек в пленке por-Si . Этот процесс характеризуется участком 4 прямых ветвей ВАХ (рис. 1).

На рис. 3 приведена температурная зависимость плотности тока при различных напряжениях прямого смещения. Представленные графики имеют вид гладких кривых, следовательно, процессы токопрохождения контролируются ловушками, энергия активации которых занимает непрерывный диапазон значений. Такая ситуация может быть характерна для поверхностных состояний. При $U = 0.03$ В энергия активации ловушек изменяется в пределах 0.163–0.023 эВ (рис. 3). При $U = 0.2$ В диапазон энергии активации составляет 0.031–0.015 эВ.

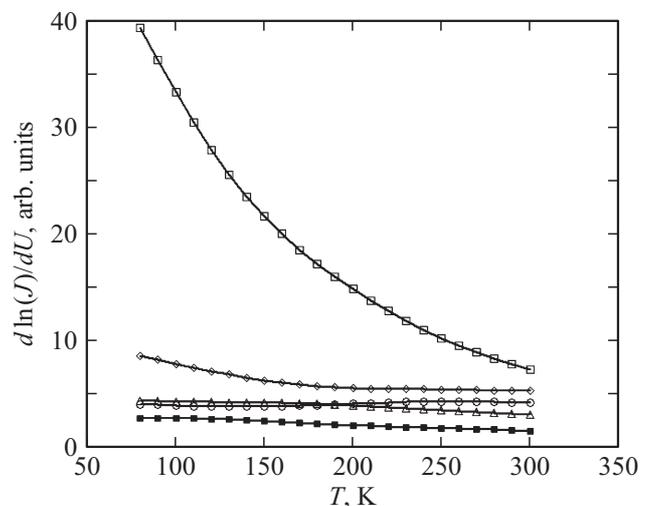


Рис. 2. Зависимость величины $d \ln(J)/dU$ от температуры при прямом смещении для значений U , В: \square — 0.2, \diamond — 0.4, \triangle — 0.8, \blacksquare — 1.2.

Столь значительное снижение энергии активации с ростом U может быть объяснено особенностью пространственного распределения ловушек.

На рис. 4 в двойном логарифмическом масштабе представлены обратные ветви ВАХ исследуемого образца при различных температурах. Во всем исследованном диапазоне температур обратные ветви ВАХ могут быть разделены на достаточно большое количество участков, в пределах которых они аппроксимируются отрезками прямых. Такая ситуация характерна для так называемых „мягких“ обратных ветвей ВАХ, наблюдаемых при лавинном пробое с участием достаточно большого числа дефектов с глубокими энергетическими уровнями [9].

В диапазоне обратных смещений 8–10 В, при температурах 80–300 К величина $d \ln(J)/dU$ слабо зависит от температуры, следовательно, согласно [7], в данной области процессы токопрохождения определяются пре-

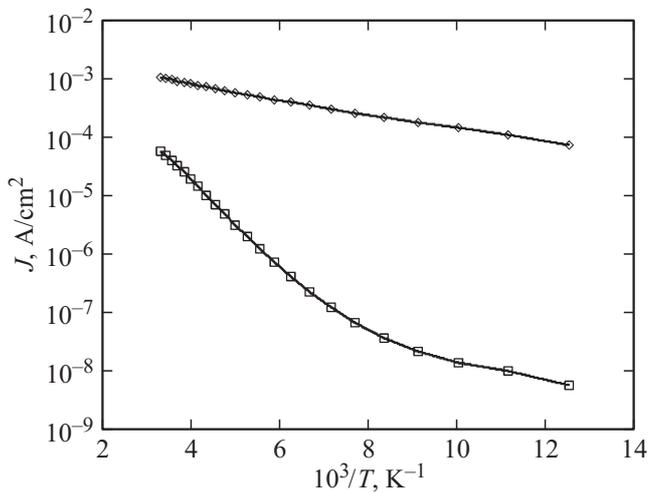


Рис. 3. Зависимость плотности тока от температуры при прямом смещении для значений U, V : □ — 0.03, ○ — 0.2.

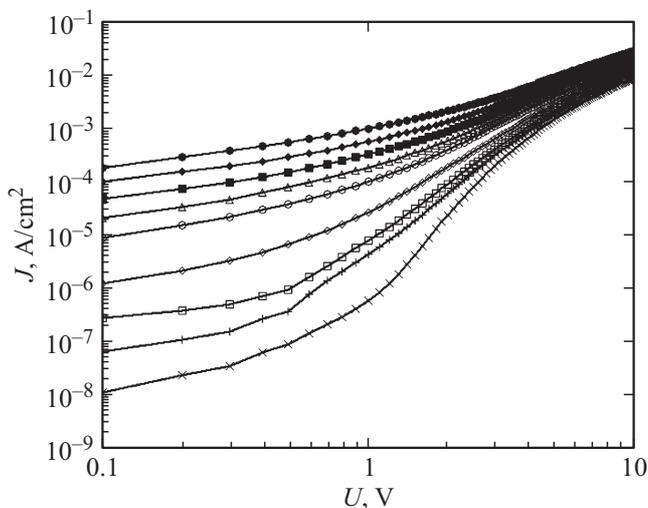


Рис. 4. Обратные ветви ВАХ при температуре T, K : × — 80, + — 120, □ — 140, ◇ — 180, ○ — 220, △ — 240, ■ — 260, ◆ — 280, ● — 300.

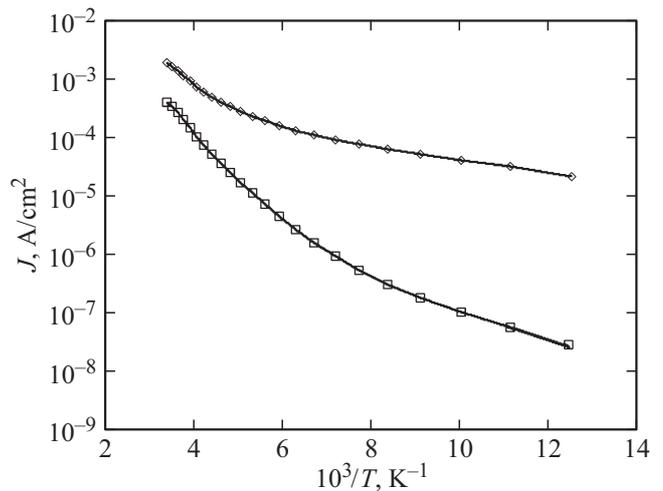


Рис. 5. Зависимость плотности тока от температуры при обратном смещении для значений U, V : □ — 0.4, ○ — 2.0.

имущественно механизмом туннелирования носителей заряда в пленке $por-Si$.

На рис. 5 представлена температурная зависимость плотности тока при различных напряжениях обратного смещения. Эти графики, так же как и при прямом смещении, имеют вид гладких кривых и характеризуют ловушки, энергия активации которых занимает непрерывный диапазон значений. При $U = 0.4 V$ энергия активации ловушек изменяется в пределах 0.225–0.025 eV (рис. 5). При $U = 2.0 V$ диапазон энергии активации составляет 0.155–0.014 eV. Наблюдаемое здесь снижение энергии активации с ростом U , как и при прямом смещении, может быть связано с особенностями пространственного распределения ловушек.

Заключение

Таким образом, процесс токопрохождения в исследуемой структуре определяется несколькими механизмами. При прямом смещении в области относительно небольших значений U (до 0.3 В) происходит перенос носителей заряда через область пространственного заряда $n^+ - p$ -перехода. Здесь преобладает механизм токопрохождения, обусловленный рекомбинацией носителей в области пространственного заряда $n^+ - p$ -перехода с участием ловушек. В области напряжений прямого смещения 0.4–0.8 В проявляется туннельный механизм токопрохождения. При более высоких U напряжение в основном приложено к пленке $por-Si$ и на процессы токопрохождения преобладающее влияние оказывает перезарядка энергетических уровней ловушек в $por-Si$.

При обратном смещении наблюдаются так называемые „мягкие“ ветви ВАХ, что может быть объяснено лавинным пробоем с участием ловушек, энергия активации которых занимает непрерывный диапазон значений. С увеличением U до 8 В проявляется механизм туннелирования носителей заряда в пленке $por-Si$.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации с использованием оборудования научно-образовательного центра „Мера“ при Рязанском государственном университете им. С.А. Есенина и регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) при Рязанском государственном радиотехническом университете.

Список литературы

- [1] *Chaoui R., Messaoud A.* // Desalination. 2007. Vol. 209. P. 118–121.
- [2] *Hyukyong Kwon, Jaedoo Lee, Minjeong Kim, Soohong Lee* // ISRN Nanotechnology. 2011. Vol. 2011. Article ID 716409. P. 1–4.
- [3] Handbook of Porous Silicon./ Ed. by L. Canham. Springer International Publishing, 2014. 1017 p.
- [4] *Трегулов В.В.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 9. С. 153–154.
- [5] *Ламперт М., Марк П.* Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. 416 с.
- [6] *Зи С.М.* Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. 456 с.
- [7] *Шарма Б.Л.* Полупроводниковые гетеропереходы. М.: Сов. радио, 1979. 232 с.
- [8] *Евтух А.А., Каганович Э.Б., Манойлов Э.Г., Семеновко Н.А.* // ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 2. С. 180–184.
- [9] *Пасынков В.В., Чиркин Л.К.* Полупроводниковые приборы: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1987. 479 с.