

Механизмы токопереноса в полупроводниковой структуре с пленкой пористого кремния, сформированной металл-стимулированным травлением

© Н.Н. Мельник¹, В.В. Трегулов², В.Г. Литвинов³, А.В. Ермачихин^{3,¶},
Е.П. Трусов³, Г.Н. Скопцова², А.И. Иванов²

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

² Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина,
390000 Рязань, Россия

³ Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина,
390005 Рязань, Россия

¶ E-mail: al.erm@mail.ru

Поступила в Редакцию 5 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 10 декабря 2021 г.

Принята к публикации 25 декабря 2021 г.

Показано, что при создании пленки пористого Si, сформированной металл-стимулированным травлением, на монокристаллической подложке Si *p*-типа образуется барьерный слой. Выпрямляющие свойства полупроводниковой структуры можно объяснить фиксацией уровня Ферми в приповерхностном слое пористого Si вследствие высокой концентрации электрически активных дефектов (глубоких центров или ловушек), что вызывает изгиб энергетических зон и возникновение потенциального барьера. Исследование комбинационного рассеяния света показало отсутствие размерных эффектов и изменения ширины запрещенной зоны в пленке пористого Si. В результате исследования температурной зависимости вольт-амперных характеристик и методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней определены энергии активации глубоких центров.

Ключевые слова: пористый кремний, глубокий уровень, метод комбинационного рассеяния света, вольт-амперные характеристики, релаксационная спектроскопия глубоких уровней.

DOI: 10.21883/FTP.2022.04.52197.9782

1. Введение

В настоящее время наблюдается значительный интерес в области исследований свойств пленок пористого кремния (*por-Si*) с целью их применения в различных областях науки и техники. Одной из наиболее важных областей применения пленок *por-Si* является создание антиотражающих покрытий кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии [1]. Для солнечной энергетики актуально использование пленок *por-Si*, изготовленных методом металл-стимулированного травления. Указанный метод обеспечивает наиболее низкую отражательную способность поверхности пленки *por-Si* по сравнению с другими методами (анодного электрохимического травления, химического окрашивающего травления), что способствует повышению эффективности солнечных элементов [1–3]. Основой метода металл-стимулированного травления является селективное химическое травление кремния с использованием предварительно осажденных на его поверхность частиц благородных металлов, наиболее часто используют серебро и золото. Травление кремния протекает непосредственно под частицами металла в растворах, содержащих плавиковую кислоту и окислитель. В результате формируется пленка *por-Si*, состоящая из нитеобразных кремниевых кристаллитов [4,5].

Пленки *por-Si*, сформированные металл-стимулированным травлением, могут применяться для создания структур, реализующих эффект усиления поверхностью комбинационного рассеяния света (SERS), повышающих чувствительность молекулярного анализа [6,7]. Кроме того, такие пленки могут использоваться для создания высокоэффективных термопреобразователей и анодов литий-ионных аккумуляторов [6,8]. Указанные области применения пленок *por-Si*, выращенных металл-стимулированным травлением, в настоящее время актуальны. В связи с указанным обстоятельством актуальна проблема изучения физических процессов, протекающих в полупроводниковых структурах, содержащих такие пленки. Основной задачей данной работы является разработка модели механизмов токопереноса в полупроводниковой структуре с пленкой *por-Si*, изготовленной методом металл-стимулированного травления, учитывая особенности микроструктуры пористой пленки и влияние ловушек с глубокими энергетическими уровнями.

2. Образцы и методы исследования

Пленка *por-Si* выращивалась методом металл-стимулированного травления с использованием частиц сереб-

ра на кремниевой монокристаллической пластине *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением $1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и ориентацией поверхности (100). В ходе первого этапа технологического процесса на Si-пластине осаждались частицы серебра из раствора: Ag_2SO_4 (0.01 M), HF (46%), $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (92%) с соотношением компонентов 1:0.1:0.3. Капля раствора наносилась на одну из поверхностей пластины и выдерживалась в течение 30 с. На втором этапе формировалась пористая структура. Пластина с предварительно нанесенными частицами серебра погружалась в раствор: H_2O_2 (1.24 M), HF (46%), $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (92%) с соотношением компонентов 1:0.5:0.25. Длительность травления составляла 20 мин. После первого и второго этапов пластина отмывалась в дистиллированной воде с целью удаления следов технологических растворов. На заключительном этапе образец отмывался в течение 15 мин в концентрированной азотной кислоте для удаления серебряных частиц из пористой пленки. Для проведения электрических измерений формировались In омические контакты к пленке *por*-Si и Si-подложке на противоположных поверхностях полупроводниковой структуры.

С целью уточнения особенностей микроструктуры пленки *por*-Si применялся метод исследования спектра комбинационного рассеяния света (КРС). Измерялись спектры КРС пленки *por*-Si и монокристаллической подложки, используемой для изготовления экспериментального образца вблизи линии первого порядка КРС кремния (520.6 см^{-1}). Для измерения спектров КРС использовался спектрометр U-1000 (Jobin Ivon). Возбуждение КРС осуществлялось излучением Ar-лазера на длине волны 488 нм, направленным вдоль нормали к поверхности образца.

Особенности механизмов токопереноса в полупроводниковой структуре изучались с помощью измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) при различных температурах. Для измерений использовалась экспериментальная установка на базе гелиевого криостата замкнутого типа Janis CCS 400/204N и электрометра Keithley-6517B со встроенным регулируемым источником постоянного напряжения. Измерения ВАХ проводились при прямом и обратном смещении в диапазоне температур $T = 70\text{--}370 \text{ К}$ с шагом 10 К. Прямое смещение соответствует приложению отрицательного потенциала к контакту на поверхности слоя *por*-Si, положительного потенциала — к омическому контакту к *p*-Si на противоположной поверхности исследуемой структуры.

Для исследования глубоких центров — ловушек носителей заряда с глубокими энергетическими уровнями (ГУ) применялся метод токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (I-DLTS). Применялся I-DLTS-спектрометр, специально адаптированный для изучения образцов с относительно большой площадью (электрической барьерной емкостью), с высокими токами утечки [9], что характерно для изучаемой полупроводниковой структуры.

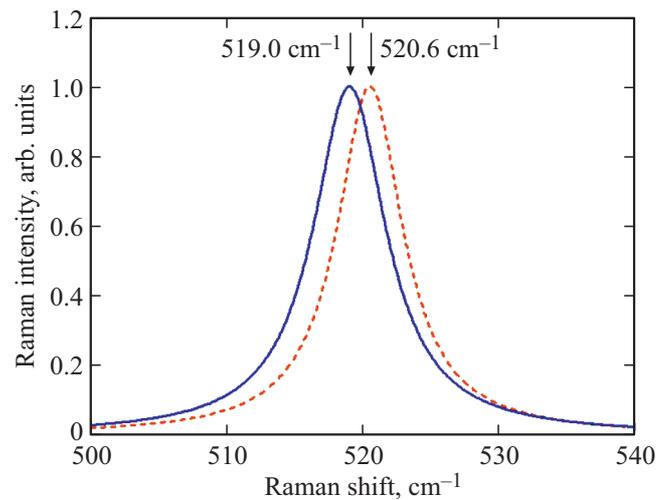


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света пленки *por*-Si (сплошная линия) и монокристаллической кремниевой подложки (пунктирная линия) экспериментального образца.

3. Эксперимент и анализ результатов

3.1. Результаты исследования спектров комбинационного рассеяния света

Спектры КРС поверхности пленки *por*-Si и кремниевой подложки показаны на рис. 1. Положение спектрального максимума линии первого порядка КРС подложки соответствует частоте 520.6 см^{-1} , что характерно для монокристаллического кремния. Для пленки *por*-Si по сравнению с подложкой линия первого порядка КРС смещена в область низких частот на 1.6 см^{-1} , при этом форма линии остается симметричной (рис. 1). Ширина рассматриваемой спектральной линии, определенная на уровне 0.5 от максимальной интенсивности, для пленки *por*-Si на 0.6 см^{-1} больше, чем для подложки. Смещение спектральной линии КРС первого порядка в сторону нижних частот, сопровождающееся ее расширением в низкочастотную область, связывают с проявлением эффекта пространственного ограничения фононов в кремниевых кристаллитах пленки *por*-Si [10–12]. В нашем случае величины сдвига спектральной линии первого порядка КРС в низкочастотную область и уширения небольшие, следовательно, эффект пространственного ограничения фононов в пленке *por*-Si не проявляется.

Наиболее вероятной причиной, объясняющей наблюдаемое поведение спектров КРС (рис. 1), является возникновение растягивающих механических напряжений в результате формирования пленки *por*-Si исследуемой полупроводниковой структуры [13]. Рост пленки *por*-Si приводит к расширению кристаллической решетки кремния в направлении, перпендикулярном поверхности образца [11,12]. Деформация решетки в основном обусловлена разориентацией плоскостей, перпендикулярных поверхности пластины [12]. В работе [11] возникновение деформаций объясняется высоким отношением площади

поверхности кремниевых кристаллитов пленки *por*-Si к их объему.

Величину механического напряжения σ в пленке *por*-Si можно оценить с помощью формулы

$$\sigma = -52.7\Delta\omega, \tag{1}$$

где $\Delta\omega = \omega - \omega_0$, ω_0 и ω — положения максимумов спектральной линии первого порядка КРС кремния при отсутствии и наличии механических напряжений соответственно, значение σ выражено в МПа [13]. Для исследуемого образца $\omega = 519.0 \text{ см}^{-1}$, $\omega_0 = 520.6 \text{ см}^{-1}$, значение σ составило 84.3 МПа.

3.2. Результаты исследования вольт-амперных характеристик

Вольт-амперные характеристики исследуемой полупроводниковой структуры при различных температурах для прямого и обратного смещения представлены на рис. 2 и 3 соответственно в виде зависимостей плотности тока J от приложенного постоянного напряжения смещения U . Для прямого смещения ветви ВАХ представлены в двойном логарифмическом масштабе (рис. 2), для обратного — в линейном масштабе (рис. 3). Из рис. 2 и 3 следует, что ВАХ исследуемой полупроводниковой структуры имеет выпрямляющий характер. Величина коэффициента выпрямления, определенная как отношение значений плотностей токов при $U = 1.0 \text{ В}$ для прямого и обратного смещения, в диапазоне температур 70–370 К снижается от 915.7 до 14.8. При $T = 300 \text{ К}$ коэффициент выпрямления составляет 72.6.

На прямых ветвях ВАХ (рис. 2) можно выделить 4 участка, которые приблизительно аппроксимируются отрезками прямых, что свидетельствует о проявлении нескольких различных механизмов транспорта носителей заряда (токопереноса) при прямом смещении.

Участок 1 прямых ветвей ВАХ (рис. 2) может быть представлен экспоненциальной зависимостью, характерной для барьерной структуры:

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

где q — элементарный заряд, n — фактор неидеальности, k — постоянная Больцмана [14]. Во всем исследованном диапазоне температур $n \approx 2$, следовательно, на участке 1 прямых ветвей ВАХ электрический ток определяется рекомбинацией носителей в области пространственного заряда.

Участок 2 прямых ветвей ВАХ может быть описан моделью тока, ограниченного пространственным зарядом (ТОПЗ), для которой характерна зависимость

$$J \propto U^m, \tag{3}$$

где m — показатель степени, характеризующий наклон соответствующего участка ВАХ [15]. В диапазоне температур 70–250 К $m > 2$, что с точки зрения модели

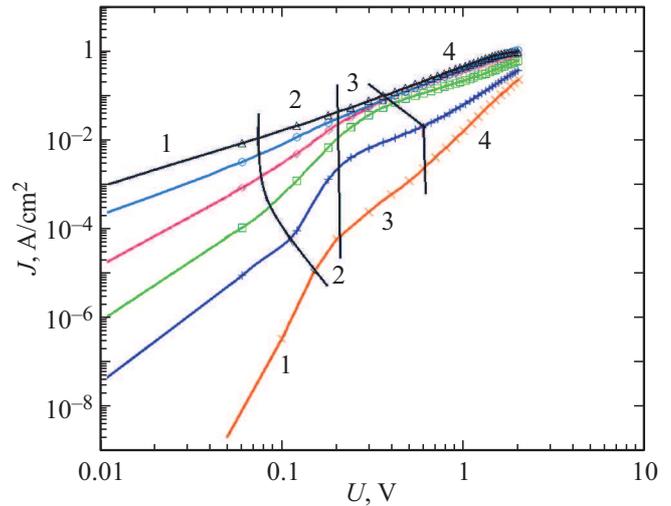


Рис. 2. Прямые ветви ВАХ при температуре T , К: \times — 70, $+$ — 140, \square — 200, \diamond — 250, \circ — 300, \triangle — 370.

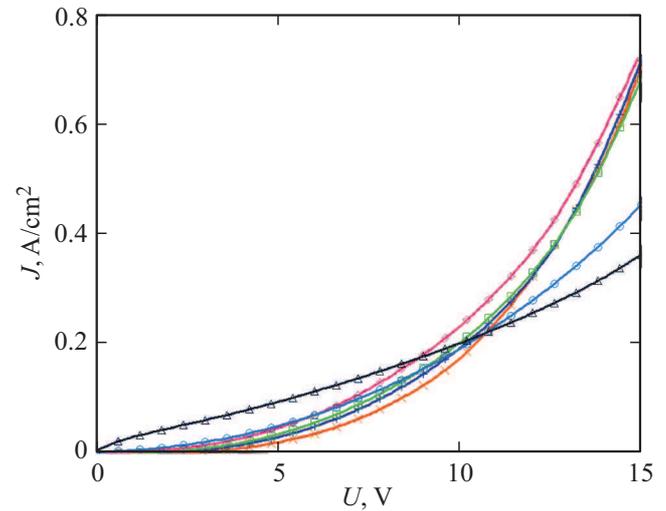


Рис. 3. Обратные ветви ВАХ при температуре T , К: \times — 70, $+$ — 140, \square — 200, \diamond — 250, \circ — 300, \triangle — 370.

ТОПЗ свидетельствует о влиянии на процессы токопереноса ловушек с экспоненциальным распределением по энергии активации [15]. При $T = 260\text{--}290 \text{ К}$ $m = 2$, что в рамках модели ТОПЗ, согласно [15], соответствует так называемому квадратичному ловушечному закону и характеризует влияние моноэнергетического глубокого центра (ловушки) на процессы токопереноса. В диапазоне температур 300–370 К на участке 2 прямых ветвей ВАХ (рис. 2) выполняется условие $1 < m < 2$. Согласно модели ТОПЗ это означает, что концентрация инжектированных носителей заряда становится сравнимой с концентрацией термически генерированных с ловушек носителей заряда [15].

На участках 3 и 4 прямых ветвей ВАХ (рис. 2) имеет место слабая зависимость величины $d(\ln J)/dU$ от температуры. Это свидетельствует о доминировании тун-

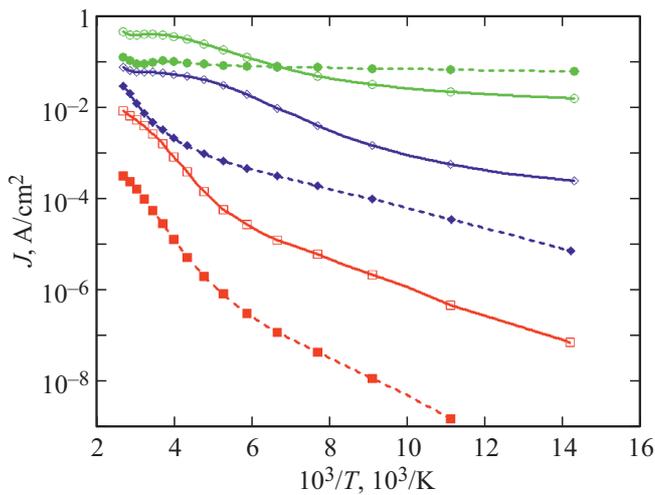


Рис. 4. Зависимость плотности тока от температуры при $U = 0$ В (■), а также при прямом смещении для значений U , В: □ — 0.1, ◇ — 0.3, ○ — 1.0 и обратном смещении для значений U , В: ◆ — 1.0, ● — 7.0.

нельного механизма токопереноса [16]. Согласно [17], туннелирование носителей заряда может происходить внутри пленки *por*-Si между энергетическими уровнями ловушек на поверхности кремниевых кристаллитов через барьеры SiO_x. Различие наклонов участков 3 и 4 ВАХ (рис. 2) может свидетельствовать о влиянии на процессы туннелирования групп ловушек с различающимися энергиями активации.

Обратные ветви ВАХ, представленные на рис. 3 в линейном масштабе, по качественному виду характерны для барьерных структур с так называемым „мягким“ пробоем [18]. В области обратного смещения слабая зависимость величины J от температуры наблюдается при $U \leq 5$ В, что также свидетельствует о туннелировании носителей заряда. Таким образом, согласно [18], вид обратных ветвей ВАХ определяется конкуренцией лавинного и туннельного пробоя с участием ловушек с непрерывным диапазоном величин энергии активации.

На рис. 4 представлены графики температурной зависимости плотности тока при разных значениях U для прямого и обратного смещения, а также при $U = 0$ В. Температурная зависимость $J(U = 0$ В) получена экстраполяцией прямых ветвей ВАХ к указанному значению U . При $U = 0$ В энергия активации ловушек изменяется в пределах 0.077–0.212 эВ (рис. 4). В области прямого смещения при $U = 0.1$ В диапазон изменения энергии активации составляет 0.061–0.181 эВ, при $U = 0.3$ В диапазон сдвигается в сторону меньших значений 0.008–0.073 эВ. Наблюдаемое снижение энергии активации с ростом U можно объяснить особенностью распределения ловушек, которая характерна для поверхностных состояний на кремниевых кристаллитах в пленке *por*-Si. При $U = 1$ В (прямое смещение) в области высоких и низких температур (рис. 4) J слабо зависит

от температуры, что может быть связано с отсутствием влияния перезарядки ловушек на процессы токопереноса, или с понижением высоты потенциального барьера, которое сопровождается эффектом туннелирования носителей заряда. В области обратного смещения при $U = 1$ В электрически активными являются состояния с энергией активации в диапазоне 0.045–0.254 эВ, что также может объясняться влиянием поверхностных состояний (рис. 4). При $U = 7$ В в области обратного смещения (рис. 4) J слабо зависит от температуры, что также может быть объяснено отсутствием влияния ловушек на процессы токопереноса или эффектом туннелирования носителей заряда.

3.3. Результаты исследования экспериментальных образцов методом токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней

При измерении I-DLTS-спектров заполнение ловушек проводилось импульсом напряжения с амплитудой 0 В, опустошение ГУ осуществлялось при напряжении обратного смещения 2 В. При таком режиме происходит преимущественно заполнение ГУ ловушек основных носителей заряда — дырок. Выбор режима измерения обусловлен ограничением на максимально возможную величину обратного тока утечки через образец для используемого I-DLTS-спектрометра [9].

Спектры I-DLTS, измеренные при значениях времени релаксации τ 0.46, 0.91 и 1.41 мс, представлены на рис. 5. На спектре присутствует пик ГУ Н1 с энергией активации $E_t = 0.46$ эВ, которая была определена по углу наклона прямой Аррениуса. Концентрация ловушек с ГУ Н1, определенная по высоте пика в соответствии с методикой, предложенной в [19], составила $1.37 \cdot 10^{16}$ см⁻³. На I-DLTS-спектре со стороны низких температур присутствует уширенное „плечо“ в области температур 130–205 К, положение которого практически не зависело от постоянной времени τ (рис. 5). Это

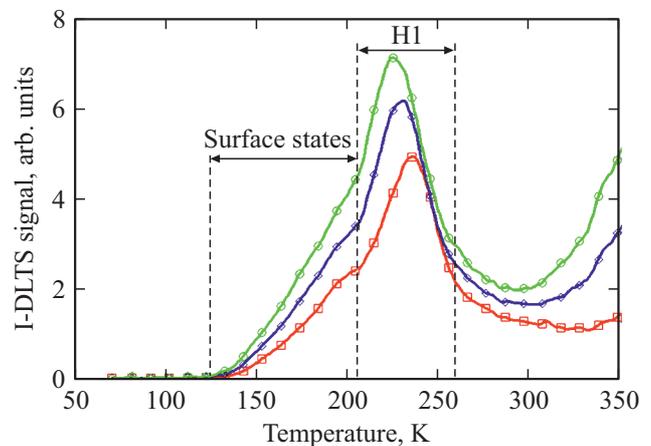


Рис. 5. Спектры I-DLTS экспериментального образца при постоянных времени τ , мс: □ — 0.46, ◇ — 0.91, ○ — 1.41.

характерно для образца с высокой плотностью поверхностных состояний [20]. В соответствии с методикой, предложенной в [20], установлено, что наблюдаемые поверхностные состояния характеризуются диапазоном энергий активации 0.23–0.35 эВ, величина плотности состояний составляет $4.96 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Наблюдаемые поверхностные состояния и ГУ Н1 в исследуемой полупроводниковой структуре являются ловушками основных носителей заряда — дырок. Важно отметить, что концентрация ГУ Н1 и плотность поверхностных состояний сравнимы с концентрацией мелкой акцепторной примеси ($1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) в кремниевой пластине. Область при $T > 300 \text{ К}$, в которой наблюдается рост I-DLTS-сигнала, объясняется резким увеличением обратного тока утечки, на фоне которого становится невозможно выделить сигнал релаксации тока. Изменение интенсивности I-DLTS-сигнала при изменении τ на рис. 5 связано с температурной зависимостью максимальной амплитуды тока релаксации в диодной структуре, в которой концентрация ловушек соизмерима с концентрацией основных носителей заряда.

3.4. Обсуждение результатов эксперимента

С помощью измерения знака термоэдс установлено, что пленка *por-Si* исследуемой полупроводниковой структуры имеет *p*-тип проводимости. Кремниевая подложка также имеет *p*-тип проводимости. Индиевые контакты к подложке и пленке *por-Si* являются невыпрямляющими (омическими). Исследования спектров КРС показали, что размерный эффект в кремниевых кристаллитах пленки *por-Si* не наблюдается. Следовательно, ширина запрещенной зоны *p-Si* подложки и кристаллитов пленки *por-Si* совпадает. Исходя из указанных соображений, ветви ВАХ при прямом и обратном смещении должны быть симметричными, в результате чего исследуемая полупроводниковая структура не должна проявлять выпрямляющих свойств. В то же время исследования показали, что в прямом смещении обнаруживается участок ВАХ, описываемый формулой (2), характерный для барьерных структур с эффектом выпрямления.

Для объяснения процессов токопереноса в исследуемой полупроводниковой структуре можно предложить модель зонной диаграммы для равновесного случая в виде рис. 6.

При формировании пленки *por-Si* возникает область с высокой концентрацией дефектов, сравнимой с концентрацией мелкой легирующей примеси в исходной пластине *p-Si*, используемой в качестве подложки. Как было установлено в результате измерения спектров I-DLTS, на границе раздела *por-Si/p-Si* присутствуют поверхностные состояния, а также дискретный ГУ Н1. Косвенным образом возникновению дефектов с ГУ в кремниевых кристаллитах пленки *por-Si* может способствовать наличие механических напряжений [21] в *por-Si*, которые обнаружены при исследовании спектров КРС. Указанная

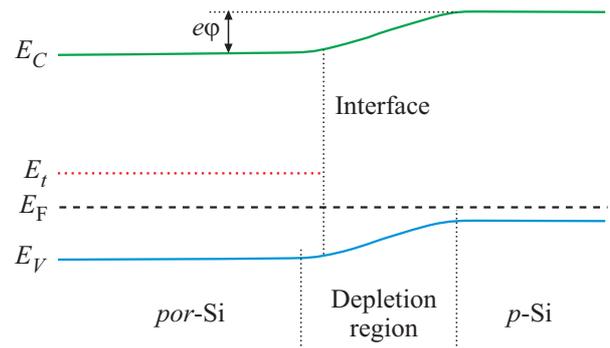


Рис. 6. Модель зонной диаграммы выпрямляющего перехода *por-Si/p-Si*.

область может представлять собой частично компенсированный полупроводник. В результате на границе между *por-Si* и *p-Si* уровень Ферми может быть зафиксирован со стороны *por-Si*. Область пространственного заряда (ОПЗ) исследуемой структуры находится в *p-Si*. Показанное на рис. 6 направление изгиба зон в ОПЗ обусловлено наличием эффекта выпрямления [14]. Величина изгиба зон на рис. 6 определяется высотой барьера $e\phi$. При приложении обратного напряжения смещения значение $e\phi$ возрастает на величину U . При прямом смещении $e\phi$ уменьшается. Указанными обстоятельствами можно объяснить выпрямляющие свойства исследуемой полупроводниковой структуры.

В результате исследования температурной зависимости ВАХ установлено, что процессы токопереноса носят сложный характер. При прямом смещении преобладают процессы рекомбинации носителей заряда в ОПЗ исследуемой полупроводниковой структуры, также проявляются механизм ТОПЗ и туннелирование носителей заряда внутри пленки *por-Si* между энергетическими уровнями ловушек на поверхности кремниевых кристаллитов через барьеры SiO_x . При обратном смещении имеет место пробой барьерной структуры, определяющийся конкуренцией лавинного и туннельного механизмов с участием ловушек. Как при прямом, так и при обратном смещении на процессы токопереноса оказывают влияние ловушки с ГУ с энергией активации, распределенной в широком диапазоне значений.

4. Заключение

Показано, что структура с пленкой *por-Si*, выращенной методом металл-стимулированного травления с использованием частиц серебра на кремниевой монокристаллической пластине *p*-типа, обладает выпрямляющими свойствами. Так как эффект ограничения фононов в кристаллитах пористой пленки не наблюдался, то это означает отсутствие размерного эффекта в пленке *por-Si*, а также совпадение величин ширины запрещенной зоны *por-Si* и монокристаллического *p-Si*. Выпрямляющие свойства

полупроводниковой структуры *por-Si/p-Si* можно объяснить наличием изгиба энергетических зон вследствие фиксации уровня Ферми в слое *por-Si* из-за высокой концентрации глубоких центров. Исследование температурной зависимости ВАХ позволило выделить четыре участка на прямой ветви. При низких напряжениях (до 0.1 В) наблюдается экспоненциальная зависимость тока, обусловленного процессами рекомбинации, характерная для полупроводниковых барьерных структур. С ростом напряжения ВАХ описывается моделью тока, ограниченного пространственным зарядом. При более высоких напряжениях наблюдается слабая зависимость величины от температуры, что свидетельствует о доминировании туннельного механизма токопереноса. Вид обратных ветвей ВАХ определяется вкладами лавинного и туннельного пробоев с участием ловушек. На спектрах релаксационной спектроскопии глубоких уровней наблюдаются пики, соответствующие глубокому уровню с энергией активации 0.46 эВ и электрически активным поверхностным состояниям с диапазоном энергий активации 0.23–0.35 эВ. Наблюдаемые поверхностные состояния и дискретный ГУ в исследуемой полупроводниковой структуре являются ловушками основных носителей заряда — дырок.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования при Рязанском государственном радиотехническом университете им. В.Ф. Уткина.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Dzhabarov, A. Bayramov. In: *Handbook of Porous Silicon*, ed. by L. Canham (Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018) p. 1479.
- [2] X. Liu, P.R. Coxon, M. Peters, B. Hoex, J.M. Cole, D.J. Fray. *Energy Environ. Sci.*, **7**, 3223 (2014).
- [3] M. Karanam, G.M. Rao, S. Habibuddin, R. Padmasuvarna. *Int. Lett. Chem., Phys. Astron.*, **71**, 40 (2016).
- [4] K.W. Kolasinski. In: *Porous Silicon: From Formation to Application. Formation and Properties*, ed. by G. Korotcenkov (London–N.Y., Taylor and Francis Group, LLC, 2016) v. 1, p. 291.
- [5] Ю.А. Жарова, В.А. Толмачев, С.И. Павлов. *ФТП*, **53** (4), 576 (2019).
- [6] H. Han, Z. Huang, W. Lee. *Nano Today*, **9** (3), 271 (2014).
- [7] H.V. Bandarenka. In: *Handbook of Porous Silicon*, ed. by L. Canham (Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018) p. 1315.

- [8] Y. Zhao, Z. Liu, C. Liang, M. Yu. Maximov, B. Liu, J. Wang, F. Yin. *Int. J. Electrochem. Sci.*, **12**, 8591 (2017).
- [9] А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов. *ПТЭ*, **2**, 118 (2018).
- [10] M. Yang, D. Huang, P. Hao. *J. Appl. Phys.*, **75** (1), 651 (1994).
- [11] M. Ivanda. In: *Handbook of Porous Silicon*, ed. by L. Canham (Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018) p. 611.
- [12] G. Amato. In: *Porous Silicon: From Formation to Application. Formation and Properties*, ed. by G. Korotcenkov (London–N.Y., Taylor and Francis Group, LLC, 2016) v. 1, p. 156.
- [13] Qiu Li, Wei Qiu, Haoyun Tan, Jiangang Guo, Yilan Kang. *Opt. Lasers Eng.*, **48** (11), 1119 (2010).
- [14] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [15] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [16] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы* (М., Сов. радио, 1979).
- [17] А.А. Евтух, Э.Б. Каганович, Э.Г. Манойлов, Н.А. Семенов. *ФТП*, **40** (2), 180 (2006).
- [18] В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. *Полупроводниковые приборы* (М., Высш. шк., 1987).
- [19] V.G. Litvinov, N.V. Vishnyakov, V.V. Gudzev, N.B. Rybin, D.S. Kusakin, A.V. Ermachikhin, S.M. Karabanov, S.P. Vikhrov, A.S. Karabanov, E.V. Slivkin. *MRS Advances*, **1** (14), 911 (2016).
- [20] Г.С. Дорджин, В.Н. Лактюшкин, М.В. Сорокина. *Обзоры по электрон. техн.*, **7** (4), 72 (1989).
- [21] К. Рейви. *Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии* (М., Мир, 1984).

Редактор Г.А. Оганесян

Current Transfer in a Semiconductor Structure with a Porous Silicon Film formed by Metal-Stimulated Etching

N.N. Melnik¹, V.V. Tregulov², V.G. Litvinov³,
A.V. Ermachikhin³, E.P. Trusov³,
G.N. Skoptsova², A.I. Ivanov²

¹ Lebedev Physical Institute
Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

² Ryazan State University named for S.A. Yesenin,
390000 Ryazan, Russia

³ Ryazan State Radio Engineering University
named after V.F. Utkin,
390005 Ryazan, Russia

Abstract It is shown that during a porous Si film formation by metal-stimulated etching a barrier layer is formed on a monocrystal *p-Si* substrate. The rectifying properties of the semiconductor structure can be explained by the fixation of the Fermi level in the near-surface layer of porous Si due to a high concentration of electrically active defects (deep centers or traps). It causes to energy bands bending and the appearance of a potential barrier. The study of Raman scattering showed the absence of size effects and a change in the band gap in the porous Si film. Activation energies of deep centers by the temperature dependence of the current-voltage characteristics and deep level transient spectroscopy study were determined.