

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ПОЛУПРОВОДНИКИ

УДК 537.9:539.217.1:621.315.592

## ФОРМИРОВАНИЕ И СТРУКТУРА МЕЗОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

© 2013 г. Н. И. Каргин<sup>1</sup>, А. О. Султанов<sup>1</sup>, А. В. Бондаренко<sup>2</sup>,  
В. П. Бондаренко<sup>2</sup>, С. В. Редько<sup>2</sup>, А. С. Ионов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Беларусь,

<sup>3</sup> ОАО «ОКБ–Планета»

Представлены результаты исследования кинетики формирования и структуры слоев мезопористого кремния, полученных методом электрохимического анодирования в электролите на основе 12%-ного водного раствора фтористо-водородной кислоты. Электролит состоял только из деионизованной воды и фтористо-водородной кислоты и не содержал никаких органических добавок для того, чтобы исключить загрязнение пористого кремния углеродом в процессе анодирования. Все эксперименты выполнены на целых пластинах кремния диаметром 100 мм, а не на образцах небольшого размера, которые часто используют для экономии кремния. В качестве исходных подложек использованы пластины монокристаллического кремния марки КЭС-0,01, вырезанные из слитков, полученных методом Чохральского.

Определены зависимости толщины слоев пористого кремния, его скорости роста и объемной пористости от плотности анодного тока и времени анодирования. Методом сканирующей электронной микроскопии изучены структура слоев пористого кремния и определены размеры и плотность каналов пор. Найдены режимы получения однородных слоев пористого кремния для их последующего использования в качестве буферных слоев при эпитаксии.

**Ключевые слова:** пористый кремний, буферный слой, электрохимическое анодирование, плотность тока, пористость

### Введение

К настоящему времени выполнено большое количество работ по формированию пористого кремния (ПК) методом электрохимического анодирования и изучению физико-химических свойств этого материала. Эти работы были начаты еще в 70-х годах прошлого столетия и имели своей целью использование ПК для активации некоторых технологических процессов кремниевой микроэлектроники [1]. Исследования ПК получили мощный дополнительный импульс после обнаружения люминесценции ПК в видимой области спектра [2]. Результаты многочисленных исследований ПК представлены в ряде обзорных работ [3–5]. Установлено, что в зависимости от режимов анодирования монокристаллического кремния с различным уровнем легирования и типом проводимости можно получить целое семейство ПК с широким диапазоном вариации размеров каналов пор. В соответствии с международной классификацией пористых тел выделяют три класса пористого кремния.

1. Микропористый кремний (диаметр пор до 2 нм).

2. Мезопористый кремний (диаметр пор от 2 до 50 нм).

3. Макропористый кремний (диаметр пор более 50 нм).

Одной из перспективных областей использования мезопористого кремния является создание буферных слоев для эпитаксиального роста пленок полупроводниковых материалов на подложках кремния. Благоприятное влияние буферного слоя мезопористого кремния было продемонстрировано для гомоэпитаксии пленок карбида кремния [7], эпитаксии пленок арсенида галлия [8], сульфида свинца [9–11], теллурида свинца [12], селенида цинка [13], нитрида галлия [14] и некоторых других материалов. Буферные слои ПК могут быть однослойными или многослойными, состоящими из нескольких слоев с различной пористостью и толщиной. Хорошо себя показала двухслойная буферная структура, состоящая из тонкого верхнего слоя ПК с низкой пористостью (менее 30 %) и более толстого нижнего слоя ПК с высокой пористостью (более 55 %). Верхний низкопористый слой обеспечивает высокое структурное совершенство эпитаксиального слоя,

а нижний высокопористый слой позволяет снизить механические напряжения в эпитаксиальных структурах, вызванные различием параметров решеток и термомеханических свойств эпитаксиальной пленки и подложки кремния. При высокой пористости второго толстого буферного слоя ПК возможно отделение эпитаксиального слоя от подложки кремния с его переносом на другую подложку после термокомпрессионного или анодного соединения. На этом принципе разработаны так называемые технологии переноса слоев (*layer transfer*), позволяющие получать полупроводниковые структуры, которые сложно или невозможно изготовить с использованием традиционных методов эпитаксии.

Отличительной особенностью большинства выполненных исследований по ПК является использование для электрохимического анодирования кремния электролитов, содержащих водно-спиртовые растворы фтористо-водородной кислоты. Такой состав электролитов для получения ПК был предложен в работе [15] и получил очень широкое применение. Введение спирта в состав электролита позволяет обеспечить лучшую смачиваемость поверхности кремния и устранить влияние пузырьков водорода на однородность слоя ПК. Несмотря на целый ряд достоинств технологического плана (хорошая смачиваемость поверхности кремния), эти электролиты имеют, по-видимому, серьезный недостаток: попадание в пористый кремний в ходе анодирования примесей углерода из спирта. Для эпитаксиальных процессов загрязнение ПК углеродом крайне нежелательно, поскольку соединения углерода могут попадать из буферного слоя ПК в растущую эпитаксиальную пленку и оказывать существенное влияние на ее дефектность. Даже при эпитаксии пленок карбида кремния, содержащих углерод в качестве структурообразующих атомов, неконтролируемое содержание углерода в ПК с большой эффективной поверхностью крайне нежелательно. В связи с этим для выполнения настоящей работы использовали электролиты, содержащие особо чистые фтористоводородную кислоту марки ОСЧ и деионизованную воду марки А, применяемые в микроэлектронном производстве. Для устранения влияния пузырьков водорода осуществляли перемешивание электролита механической мешалкой. Стоит отметить, что при таком подходе принципиально важным является контроль однородности формируемых слоев ПК (разброс значений толщины слоя ПК по диаметру пластин).

Цель работы — исследование кинетики формирования и определение объемной плотности слоев мезопористого кремния, полученных методом электрохимического анодирования в водных растворах фтористо-водородной кислоты для выбора режимов получения однородных слоев ПК с широким набором толщин и пористости для их последующего использования в качестве буферных слоев. В соответствии

с этой целью ниже рассмотрена задача получения слоев ПК с различной объемной плотностью (различной пористостью) и толщиной от нескольких сотен нанометров до нескольких микрометров.

### Методика проведения экспериментов

Основными макроскопическими параметрами ПК являются толщина и объемная плотность, характеризующая пористость материала. К этим параметрам при использовании ПК как буферного слоя предъявляют достаточно жесткие требования по их воспроизводимости от пластины к пластине при анодировании партии пластин в одинаковых режимах. Дополнительно необходимо контролировать однородность толщины в пределах площади анодируемых подложек кремния.

Отличительной особенностью данной работы является то, что все эксперименты выполняли на целых пластинах кремния диаметром 100 мм, а не на образцах небольшого размера, которые часто используют для экономии кремния. Пластины кремния с ориентацией (100) вырезали из монокристаллических слитков, легированных сурьмой до уровня  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  в процессе выращивания методом Чохральского. Пластины были изготовлены на предприятии Филиал «Камертон» ОАО «ИНТЕГРАЛ» и удовлетворяли требованиям ЕТО 035.206. Удельное сопротивление пластин составляло 0,01 Ом · см.

Перед анодированием пластины кремния подвергали химической обработке в кипящем перекисно-аммиачном растворе с последующей промывкой в проточной деионизованной воде и сушкой на центрифуге. Электрохимическое анодирование пластин проводили в электрохимической ячейке, изготовленной из фторопласта. Электролит для анодирования состоял из 1 объемной части концентрированной (46 %) фтористо-водородной кислоты и 3 частей деионизованной воды. Диаметр зоны анодирования составлял 92 мм. Пластина кремния была расположена в ячейке на медном столике (анод), покрытом пленкой золота. Катод изготавливали в форме спирали из платиновой проволоки. Механическую мешалку из фторопласта размещали между пластиной и катодом. Расстояние от поверхности пластины до мешалки составляло ~2—3 мм. Частоту вращения мешалки поддерживали постоянной во всех экспериментах; она составляла 120 об/мин.

Для формирования ПК обычно используют гальваностатический режим анодирования, при котором анодный ток через образец поддерживают постоянным во времени. Это означает, что постоянной во время анодирования является плотность анодного тока, которая определяется как величина тока на  $1 \text{ см}^2$  площади анодируемой поверхности кремния. Для реализации гальваностатического режима в качестве источника постоянного тока использовали потенциогальваностат Metrohm Autolab PGSTAT 302N.

Толщину слоев ПК измеряли на шаровых шлифах, которые изготавливали по диаметру пластины кремния в 8 точках на расстоянии примерно 1 см. По результатам измерений определяли среднюю толщину слоя ПК. Объемную плотность ПК рассчитывали на основании измерений уменьшения массы пластин после анодирования и знания толщины слоя ПК.

Важные микроскопические структурные характеристики ПК — размеры каналов пор и плотность пор (количество пор на единицу площади поверхности, как правило на  $1 \text{ см}^2$ ). Эти параметры определяли по результатам изучения поверхности и поперечных сколов пластин со слоями ПК методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Hitachi-S4800.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости толщины  $T$  слоев ПК от времени анодирования  $t$  для различных плотностей анодного тока  $j$  (от 1 до  $70 \text{ мА/см}^2$ ). Образцы ПК были изготовлены при плотности анодного тока 1, 3, 5, 10, 20, 50 и  $70 \text{ мА/см}^2$ . Для каждой плотности анодного тока было изготовлено по 6 образцов с различным временем анодирования. Каждая экспериментальная точка на рис. 1 представляет среднее значение толщины слоя ПК, определенное по результатам измерений в 8 точках по диаметру пластины.

Как видно из рис. 1, зависимости толщины слоев ПК от времени анодирования строго линейны для всех использованных плотностей анодного тока. Наклон прямых линий характеризует скорость роста ( $V$ ) ПК. Линейность зависимости толщины слоя ПК от времени анодирования означает, что при постоянной плотности анодного тока (гальваностатический режим анодирования) скорость роста ПК в рамках проведенного эксперимента не изменялась. Таким образом, при постоянной плотности тока за одинаковые промежутки времени происходит одинаковое приращение толщины пористого слоя. Следовательно, можно ожидать, что за одинаковые промежутки времени происходит растворение одного и того же количества кремния, а это означает, что количество пор и их размеры должны оставаться неизменными в ходе пористого анодирования при постоянной плотности анодного тока. Это очень важный с практической точки зрения результат, позволяющий задавать требуемую толщину слоя ПК путем выбора требуемого времени анодирования.

Как видно из рис. 1, с увеличением плотности анодного тока наклон прямых линий  $T = Vt$  увеличивается, что свидетельствует об увеличении скорости роста ПК. Из представленных на рис. 1 данных можно определить зависимость скорости роста ПК от плотности анодного тока (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что скорость роста ПК возрастает с увеличением плотности анодного тока, и эта

зависимость не является линейной. Прирост скорости роста ПК замедляется с увеличением плотности анодного тока. Данные, приведенные на рис. 2, по зависимости скорости роста ПК от плотности анодного тока также имеют важное практическое значение для оптимизации процесса изготовления ПК с заданной толщиной.

Одним из важных параметров ПК является объемная плотность и связанная с ней пористость ПК. На рис. 3 представлена зависимость объемной плотности ПК от плотности анодного тока  $j$ . Как видно из рис. 3, при увеличении  $j$  от 1 до  $10 \text{ мА/см}^2$  объемная плотность слоя ПК возрастает от  $1,8$  до  $2,1 \text{ г/см}^3$ , что соответствует уменьшению пористости от 22,4 до 9,5 %.

В диапазоне  $j = 5 \div 20 \text{ мА/см}^2$  объемная плотность ПК имеет максимальное значение  $2,0 \text{—} 2,1 \text{ г/см}^3$  (пористость 14—9,5 %) и слабо зависит от плотности анодного тока. При увеличении плотности анодного тока от 20 до  $90 \text{ мА/см}^2$  наблюдается уменьшение объемной плотности ПК. При  $j = 90 \text{ мА/см}^2$  объемная плотность ПК составляет  $0,5 \text{ г/см}^3$ , что соответствует пористости 78,4 %. Это означает, что в полученном слое ПК «остов» монокристалла занимает объем

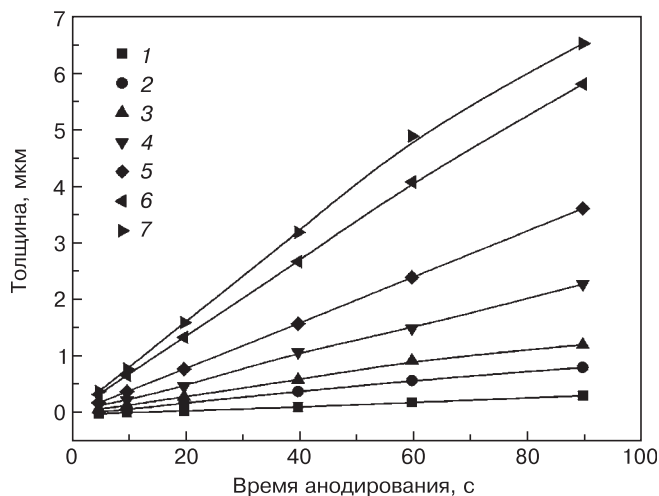


Рис. 1. Зависимости толщины слоев ПК от времени анодирования при различных плотностях анодного тока  $j$ ,  $\text{мА/см}^2$ : 1 — 1; 2 — 3; 3 — 5; 4 — 10; 5 — 20; 6 — 50; 7 — 70

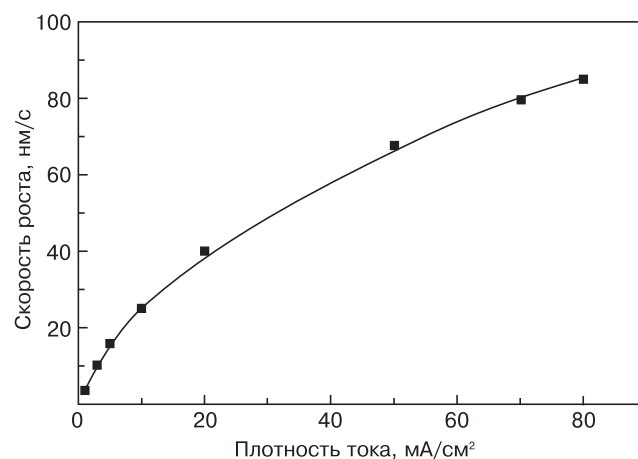


Рис. 2. Зависимость скорости роста ПК от плотности анодного тока

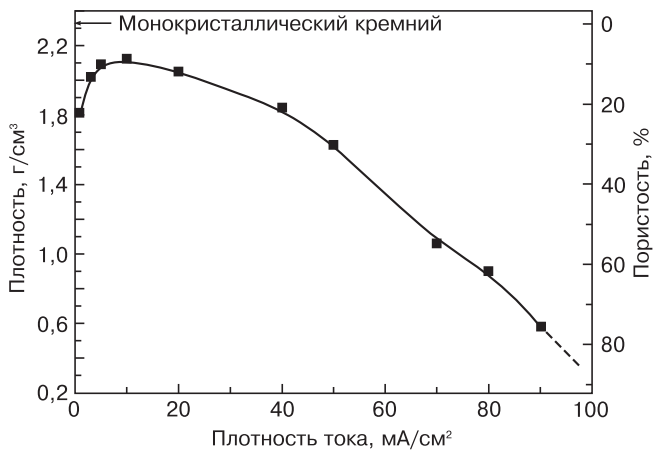


Рис. 3. Зависимость объемной плотности ПК от плотности анодного тока

~21,6 %, а 78,4 % кремния удалено при электрохимическом растворении. Слои ПК с объемной плотностью менее  $0,4 \text{ г}/\text{см}^3$  (пористость выше 83 %) растрескивались при сушке на воздухе и отслаивались от подложки кремния. Механическая прочность таких высокопористых слоев ПК была низкой, что делало сложным исследование их характеристик.

В области низких плотностей анодных токов (менее  $5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ), объемная плотность ПК резко падает при уменьшении  $j$  до значений менее  $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ . Область плотностей анодных токов менее  $5 \text{ mA}/\text{cm}^2$  характеризуется низкой воспроизводимостью результатов. К настоящему времени установлено, что при низких плотностях токов анодирования существенную роль в образовании ПК играют, наряду с электрохимическим растворением, процессы химического растворения остова пористого материала. С практической точки зрения выбирать режимы анодирования в области малых плотностей анодных токов для получения слоев ПК с требуемыми и воспроизводимыми параметрами нецелесообразно.

Анализируя полученные данные можно заключить, что слои ПК толщиной от нескольких сотен нанометров до нескольких микрометров и пористостью 10—75 % можно получать на сильнолегированных монокристаллах кремния электронного типа проводимости при использовании 12%-ного водного раствора фтористо-водородной кислоты. В этом электролите для изменения пористости ПК в диапазоне от 10 до 75 % достаточно изменить плотность анодного тока от 10 до  $90 \text{ mA}/\text{cm}^2$ .

Для изучения структуры полученных образцов ПК использовали сканирующий электронный микроскоп Hitachi-S4800. Исследования проводили для поверхности и сколов образцов ПК, полученных в различных режимах анодирования. На рис. 4 в качестве примера приведена микрофотография поверхности слоя ПК, полученного в результате анодирования в течение 10 с при плотности анодного тока  $80 \text{ mA}/\text{cm}^2$ .

На микрофотографии видны входные отверстия каналов пор на поверхности ПК. Отверстия каналов пор имеют округлую форму. Характерен разброс диаметров каналов пор. На рис. 5 представлена микрофотография скола этого же образца. Толщина слоя ПК составляет 855 нм. Каналы пор имеют форму цилиндров и направлены перпендикулярно к поверхности пластины кремния. На поверхности слоя ПК диаметр каналов пор меньше, чем в глубине пор.

Анализ микрофотографии, представленной на рис. 4, с помощью программы статистического графического анализа растровых изображений позволил определить площадь каждой поры, рассчитать эквивалентный диаметр каждой поры и распределение пор по эквивалентным диаметрам, а также определить количество пор на  $1 \text{ см}^2$  поверхности образца. Эквивалентные диаметры определяли из значений площади входных отверстий каналов пор при допущении, что отверстия каналов пор на поверхности имеют форму круга. Гистограмма распределения пор по эквивалентным диаметрам для образца ПК, полученного в результате анодирования в течение 10 с при плотности анодного тока  $80 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , приведена на рис. 6.

Как видно из гистограммы (см. рис. 6), распределение пор по эквивалентным диаметрам имеет

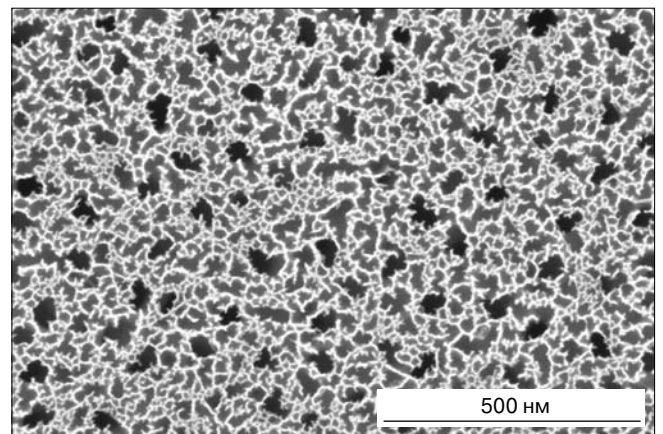


Рис. 4. Микрофотография поверхности слоя ПК, полученного при плотности анодного тока  $80 \text{ mA}/\text{cm}^2$

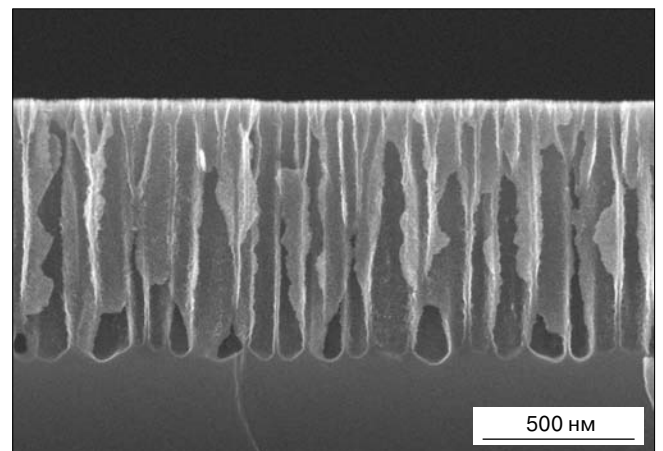


Рис. 5. Микрофотография скола слоя ПК, полученного при плотности анодного тока  $80 \text{ mA}/\text{cm}^2$

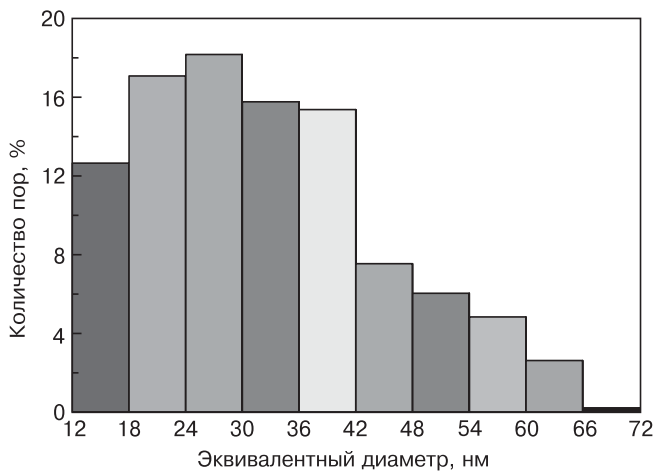


Рис. 6. Гистограмма распределения пор по эквивалентным диаметрам

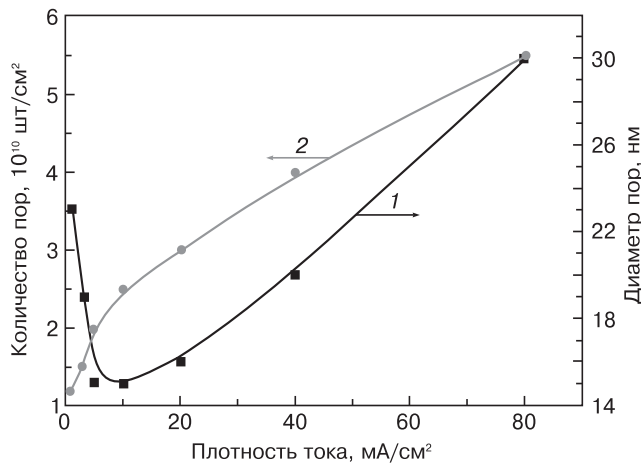


Рис. 7. Зависимости среднего эквивалентного диаметра (1) и плотности (2) пор на поверхности слоя ПК от плотности анодного тока

колоколообразную форму. Если ввести для этого распределения такой параметр, как средний эквивалентный диаметр пор, то для гистограммы на рис. 6 эта величина может быть оценена как 30 нм. Количество пор на единицу площади поверхности анализируемого образца составило  $5,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . По такой методике анализа изучали результаты сканирующей электронной микроскопии образцов ПК, полученных при различных режимах анодирования. На рис. 7 приведены зависимости средних эквивалентных диаметров каналов пор и количества пор (плотности пор) на поверхности образцов ПК от плотности анодного тока.

Из рис. 7 видно, что при низких плотностях анодного тока средний эквивалентный диаметр пор уменьшается с увеличением  $j$  от 1 до  $10 \text{ мА/см}^2$  и при  $j = 10 \text{ мА/см}^2$  поры имеют минимальный диаметр 15 нм. При увеличении плотности анодного тока от 10 до  $80 \text{ мА/см}^2$  диаметр пор увеличивается от 15 до 30 нм. Зависимость плотности пор на поверхности ПК имеет другой характер (см. рис. 7). При увеличении плотности тока от 1 до  $10 \text{ мА/см}^2$  количество пор увеличивается от  $1 \cdot 10^{10}$  до  $2,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и затем в диапа-

зоне плотностей токов от 10 до  $80 \text{ мА/см}^2$  количество пор постепенно возрастает до  $5,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

### Заключение

Получены образцы мезопористого кремния с использованием различных режимов гальваностатического анодирования и водного раствора плавиковой кислоты в качестве электролита. На основе результатов структурных и гравиметрических исследований построены зависимости, отражающие кинетику формирования слоев мезопористого кремния, а также определена их объемная плотность в зависимости от режимов анодирования. Показано, что, используя эти данные, можно задавать режимы формирования одного или нескольких слоев мезопористого кремния с требуемыми параметрами. Проведена статистическая обработка растровых снимков поверхности мезопористого кремния, результаты которой позволяют утверждать, что водный раствор без добавления спирта пригоден для формирования относительно однородных на макроскопическом уровне слоев мезопористого кремния. В дальнейшем авторами будут проведены исследования элементного и химического состава полученных образцов, чтобы сделать окончательный вывод о преимуществах формирования мезопористого кремния в водном растворе фтористоводородной кислоты без добавления спирта. Но уже полученные результаты выглядят многообещающе.

### Библиографический список

1. Labunov, V. A. Poristy kremnii v poluprovodnikovoi elektronike / V. A. Labunov, V. P. Bondarenko, V. E. Borisenko // Zaru-bezhnaya elektronnaya tehnika. – 1978. – N 15. – P. 3–47.
2. Canham, L. T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers / L. T. Canham // Appl. Phys. Lett. – 1990. – V. 57. – P. 1046–1048.
3. Bomchil, G. Porous silicon: the material and its application in silicon-on-insulator technologies / G. Bomchil, A. Halimaoui, R. Herino // Appl. Surf. Sci. – 1989. – V. 41/42. – P. 604–613.
4. Properties of porous silicon / Ed. by L. Canham. – Malvern : DERA, 1997. – 400 p.
5. Balagurov, L. A. Poristy kremnii. Poluchenie, svoitva, voz-mozhnye primeneniya / L. A. Balagurov // Materialovedenie. – 1998. – Iss. 1. – P. 50–56. – Iss. 3. – P. 23–45.
6. Shengurov, V. G. Vyrashivanie metodom MLE gomo-epitaksial'nyh sloev kremniya na poverhnosti poristogo kremniya posle nizkotemperaturnoi ochistki ee v vakuume / V. G. Shengurov, V. N. Shabanov, N. V. Gudkova, B. Ya. Tkach // Mikroelektronika. – 1993. – V. 22, Iss. 1. – P. 19–21.
7. Naderi, N. Nanocrystalline SiC sputtered on porous silicon substrate after annealing / N. Naderi, M. Hashim // Mater. Lett. – 2013. – V. 97. – P. 90–92.
8. Saravanan, S. Growth and characterization of GaAs epitaxial layers on Si/porous silicon/ Si substrates by chemical beam epitaxy / S. Saravanan, Y. Hayashi, T. Soga, T. Jimbo, M. Umemo, N. Sato, T. Yonehara // J. Appl. Phys. – 2001. – V. 89. – P. 5215–5218.
9. Bondarenko, V. P. Geteroepitaksiya sul'fida svintsya na krem-nii / V. P. Bondarenko, N. N. Vorozov, V. V. Dikareva, A. M. Dorofeev, V. I. Levchenko, L. I. Postnova, G. N. Troyanova // Pis'ma v ZhTF. – 1994. – V. 20, Iss. 10. – S. 51–54.
10. Levchenko, V. Heteroepitaxy of PbS on porous silicon / V. Levchenko, L. Postnova, V. Bondarenko, N. Vorozov, V. Yakovtseva, L. Dolgyi // Thin Solid Films. – 1999. – V. 348. – P. 141–144.
11. Yakovtseva, V. Porous silicon: a buffer layer for PbS heteroepitaxy / V. Yakovtseva, N. Vorozov, L. Dolgi, V. Levchenko, L. Postnova, M. Balucani, V. Bondarenko, G. Lamedica, V. Ferrara, Ferrari A. // Phys. status solidi (a). – 2000. – V. 182. – P. 195–199.

12. Belyakov, L. V. Issledovanie IK fotodiodov na osnove PbTe, poluchennyh na bufernom podsloe poristogo kremniya / L. V. Belyakov, I. B. Zaharova, T. I. Zubkova, S. F. Musihin, S. A. Rykov // FTP. – 1997. – V. 31. – P. 93–95.

13. Chang, C. Characterization and fabrication of ZnSe epilayer on porous silicon substrate / C. Chang, C. Lee // Thin Solid Films. – 2000. – V. 379. – P. 287–291.

14. Ishikawa, H. MOCVD growth of GaN on porous silicon substrates / H. Ishikawa, K. Shimanaka, F. Tokura, Y. Hayashi, Y. Hara, M. Nakanishi // J. Cryst. Growth. – 2008. – V. 310. – P. 4900–4903.

15. Halimaoui, A. Influence of wettability on anodic bias induced electroluminescence in porous silicon / A. Halimaoui // Appl. Phys. Lett. – 1993. – V. 63. – P. 1264–1266.

*Авторы выражают благодарность В. В. Цыбульскому (Государственный центр «Белмикрoанализ» филиала «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ») за проведение структурных исследований образцов пористого кремния.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ГК № 16.523.12.3004).*

УДК: 621.315.592

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КИСЛОРОДА И ЭРБИЯ В КРЕМНИИ ПРИ ДИФФУЗИОННОМ ЛЕГИРОВАНИИ

© 2013 г. М. Н. Дроздов, Н. В. Латухина\*, М. В. Степихова, В. А. Покоева\*, М. А. Сурин\*  
Институт физики микроструктур РАН,  
\*ГОУ ВПО «Самарский государственный университет»

Проведены исследования состава диффузионных слоев кремния, легированного редкоземельным элементом эрбием. Диффузия проведена из оксидной пленки эрбия, созданной на поверхности пластины кремния. Методом вторичной ионной масс-спектрометрии определены концентрационные профили эрбия и кислорода в кремнии. Профиль электрически активного эрбия определен методом измерения поверхностного сопротивления и подвижности носителей заряда при последовательном стравливании слоев. Рассчитан коэффициент диффузии эрбия при температуре 1240 °С, его значение составило  $4,8 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ . Предложена модель одновременной диффузии эрбия и кислорода в кремний, учитывающая процесс связывания эрбия и кислорода в комплексы. Путем сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными показано их хорошее совпадение для приповерхностной области диффузионного слоя.

**Ключевые слова:** диффузионное легирование, кислород, эрбий, оксидные пленки, вторичная ионная масс-спектрометрия.

### Введение

Кремний, легированный эрбием, является перспективным материалом для создания эффективных светоизлучающих структур, легко интегрируемых в кремниевую электронику. Среди методов изготовления подобных структур практически не используют такой метод, как диффузия, так как эффективность эрбиевой люминесценции в диффузионных структурах низка. Это обычно связывают с недостаточно высокой концентрацией примеси эрбия в кремнии при диффузионном легировании, ограниченной пределом растворимости редкоземельных элементов (РЗЭ) в кремнии [1–4]. Однако исследование концентрации РЗЭ в кремнии методом неразрушающего ядерного микроанализа показало, что общее содержание РЗЭ в поверхностных слоях кремния может значительно превышать пределы их растворимости [5, 6]. Поэтому низкая эффективность эрбиевой люминесценции может быть связана не столько с малой

концентрацией примеси, сколько со слабой оптической активностью люминесцентных центров или дефектным гашением люминесценции [7]. Следует отметить, что наиболее эффективные люминесцентные центры отождествляют с ионами РЗЭ, окруженными шестью ионами кислорода [2]. Высокий уровень люминесценции показывает пористый кремний, диффузионно легированный эрбием [8]. В связи с этим представляет интерес подробное исследование процесса диффузии эрбия в кремний в присутствии кислорода. Поэтому в качестве материала источника диффундирующей примеси был выбран полуторный оксид эрбия, содержащий кислород в достаточно большом количестве.

### Методики изготовления и исследования образцов

Диффузию осуществляли из оксидного слоя эрбия, созданного на поверхности пластины монокристаллического кремния *n*-типа проводимости окислением пред-