

## Исследования наноразмерных пленок $\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученных на пористом кремнии методом ионно-плазменного распыления

© П.В. Середин\*<sup>¶</sup>, А.С. Леньшин\*, Д.Л. Голощапов\*, А.Н. Лукин\*, И.Н. Арсентьев<sup>†¶</sup>,  
А.Д. Бондарев<sup>+</sup>, И.С. Тарасов<sup>+</sup>

\* Воронежский государственный университет,  
394006 Воронеж, Россия

<sup>+</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 4 декабря 2014 г. Принята к печати 15 декабря 2014 г.)

Цель работы — получение наноразмерных пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на поверхности нанопористого кремния, а также фундаментальные исследования структурных, оптических и морфологических свойств этих материалов.

Анализируя полученные нами результаты, можно утверждать, что с использованием метода ионно-плазменного распыления на слое пористого кремния могут быть получены ультратонкие наноструктурированные пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в виде ориентированных в одном направлении нитей, расположенных на расстоянии 300–500 нм друг от друга. Такой механизм роста оксида алюминия обусловлен кристаллографической ориентацией исходной пластины монокристаллического кремния, используемой для создания пористого слоя.

Результаты оптической спектроскопии показывают, что гетерофазная структура  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$  отлично пропускает электромагнитное излучение в области 190–900 нм. Обнаруженный максимум в дисперсии показателя преломления пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , выращенной на *por-Si*, совпадает со значением края оптического поглощения оксида алюминия и расположен в области  $\sim 5.60$  эВ. Этот факт подтверждается результатами расчетов из спектра оптического поглощения гетерофазной структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$ .

Сформированные на поверхности гетерофазной структуры в виде наноразмерных структурированных нитей пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  могут служить оптическими проводящими каналами и достаточно эффективно внедрены в стандартные технологии, что имеет огромное значение для микро- и оптоэлектроники.

Сегодня кремний — это основной материал микро- и нанoeлектронной технологии. Масштабирование размеров функциональных элементов на его основе по сути сдерживается лишь развитием технологии создания качественного слоя изолятора, причем в последнее время все активнее на эту роль претендует оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [1–3], который имеет высокую термическую стабильность, диэлектрическую постоянную  $\sim 11$  и широчайшую область оптической прозрачности в диапазоне 200–5000 нм. Кроме того,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  может быть достаточно эффективно внедрен в стандартные CMOS технологии, что имеет огромное значение как для электроники, так и для оптики.

Не менее важным является и тот факт, что формирование на кремниевой подложке пленки оксида алюминия привлекает повышенный интерес в связи с его отличным потенциалом для высокоэффективной и однородной пассивации поверхности кристаллического кремния (*c-Si*), которая имеет решающее значение при создании кремниевых солнечных элементов [4,5].

Однако при всем этом создание эффективных оптоэлектронных устройств на основе кремния невозможно, поскольку Si представляет собой непрямозонный полупроводник с очень слабой излучательной способностью и достаточно эффективное преобразование электрической энергии в видимый свет в кремниевых устройствах осуществить не удастся. Все же электронные свойства кремния можно изменить, формируя на его основе

наноструктуры — пространственно разделенные кремниевые участки с минимальными размерами в несколько нанометров [6–8]. В этом случае носители заряда (электроны и дырки) приобретают дополнительную энергию вследствие квантового размерного эффекта. Данный эффект ведет к увеличению ширины запрещенной зоны наноструктуры по сравнению с монокристаллом этого материала. Помимо этого, легкость управления свойствами пористого кремния, его совместимость с технологическими операциями кремниевой микроэлектроники и многое другое позволяют надеяться на будущую разработку других электронных и оптических приборов на основе *por-Si* слоев с низкой, средней, высокой степенью пористости.

Кроме того, использование пористого кремния весьма перспективно ввиду создания на его основе так называемых „податливых“ (*compliant*) подложек, т.е. искусственно созданной платформы для эпитаксиального наращивания пленок  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ . Известно, что слои пористого кремния имеют коэффициенты упругости существенно более низкие, чем у полупроводников группы  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ . Использование таких искусственных подложек является одним из путей реализации интегральных схем на кремнии с оптическими связями. Важно подчеркнуть, что создание контактов к пористому кремнию при изготовлении полупроводниковых приборов представляет собой весьма сложную задачу, поскольку сам материал является не слишком стабильным во времени по своим свойствам.

Поэтому, учитывая все вышесказанное, а также неподдельный интерес к формированию  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}\text{-Si}$ -струк-

<sup>¶</sup> E-mail: paul@phys.vsu.ru

<sup>¶¶</sup> E-mail: arsenteyev@mail.ioffe.ru

тур [9–13], а также их интеграции с кремнием [14–16], целью нашей работы стало получение наноразмерных пленок  $Al_2O_3$  на поверхности нанопористого кремния, а также фундаментальные исследования структурных, оптических и морфологических свойств этих материалов.

## 1. Объекты, технология и методы исследования

В данной работе нами была получена и исследована гетерофазная структура  $Al_2O_3/por-Si/Si(111)$ . Слой пористого кремния в структуре мы получали методом электрохимического травления монокристаллических пластин кремния ориентации (111) с удельным сопротивлением пластины  $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  в спиртовом растворе плавиковой кислоты по стандартной методике [6,17]. Толщина пористого слоя составляла порядка 200 нм.

Далее с использованием метода ионно-плазменного распыления на слой пористого кремния наносилась пленка  $Al_2O_3$ . Для этого производилась бомбардировка мишени из алюминия марки А-99.99 ионами кислорода в плазме чистого кислорода (марки ОСЧ) без специального добавления аргона. Было подобрано оптимальное соотношение потенциалов катода, анода, мишени и образца, а также давление кислорода в рабочей камере установки, когда наблюдалось устойчивое горение плазмы. Рабочее давление варьировалось в диапазоне  $(1-3) \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ . Подложка за время процесса напыления разогревалась до  $150-200^\circ\text{C}$ . Процесс образования пленки складывался из нескольких составляющих: а) образование окисной пленки на поверхности мишени с последующим выбиванием ионами кислорода молекул  $Al_2O_3$ , которые далее осаждались на подложку, б) выбивание ионами кислорода атомов алюминия с последующим окислением в межэлектродном пространстве (вероятность такого процесса достаточна мала), в) осаждение атомов алюминия на подложку с последующим их окислением на поверхности, г) осаждение атомов алюминия в виде металлического алюминия. Варьируя параметры процесса, такие как ток катода, потенциалы анода, мишени и образца, температуру подложки, давление, степень очистки и состав (смесь кислорода и аргона) рабочего газа, можно изменять соотношение вкладов а), б), в) и г) в результирующий процесс, меняя тем самым состав и свойства напыляемой пленки (в том числе степень кристалличности аморфной пленки  $Al_2O_3$ ). При определенных условиях вклад составляющей г) можно свести практически к нулю.

Немаловажное значение для устойчивости горения кислородной плазмы в процессе напыления составляла предварительная подготовка оснастки рабочей камеры установки. Чтобы исключить накопление заряда на диэлектрической пленке оксида алюминия, осевшей на оснастке от предыдущего процесса, перед каждым процессом производилось запыление всей оснастки камеры (включая держатель образца) алюминием посредством распыления алюминиевой мишени в плазме аргона. Для

повышения устойчивости процесса горения кислородной плазмы в рабочей камере была разработана специальная конструкция анодной пластины из нержавеющей стали.

Концентрации элементов в пленке были уточнены методом рентгеновского микроанализа с использованием приставки Oxford Instruments к электронному микроскопу JEOL.

Структурную диагностику полученного гетерофазного образца  $Al_2O_3/por-Si/Si(111)$  мы проводили методами рентгеновской дифракции, с использованием дифрактометра ДРОН 4-07 с кобальтовой трубкой. Исследования качества поверхности структуры были выполнены на электронном микроскопе Libra 120 Carl Zeiss.

Оптические свойства гетерофазной структуры  $Al_2O_3/por-Si/Si(111)$  изучались в диапазоне  $190-900 \text{ нм}$  методом UV-спектроскопии, с помощью прибора LAMBDA 650 фирмы Perkin Elmer, оснащенного универсальной приставкой URA, позволяющей получать спектры отражения в интервале углов падения от  $8$  до  $80^\circ$ . При этом рабочая схема приставки позволяет получать абсолютное отражение. Спектры отражения нами были получены при различных углах падения в диапазоне  $8-67^\circ$ .

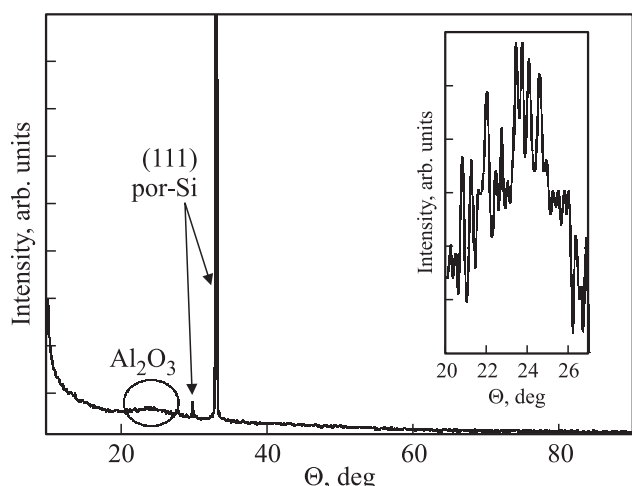
## 2. Экспериментальные результаты

### 2.1. Фазовый анализ

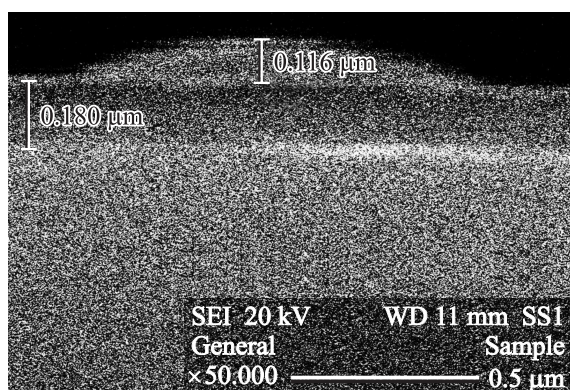
Используя приставку для рентгеновского микроанализа к электронному микроскопу, мы уточнили концентрации элементов входящих в состав пленки гетерофазной структуры  $Al_2O_3/por-Si/Si(111)$ . Для анализа использовалось ускоряющее напряжение электронов  $20 \text{ кВ}$  и исследовались участки образца порядка  $750 \times 750 \text{ мкм}$ . Эффективная глубина микроанализа составила порядка  $\sim 0.5 \text{ мкм}$ . Эксперимент показал, что в пленке присутствует алюминий ( $40 \text{ ат\%}$ ) и кислород ( $60 \text{ ат\%}$ ), что подтверждает рост пленки состава  $Al_2O_3$ .

Как уже было отмечено ранее, исследования фазового состава и структурного качества ультратонкой пленки  $Al_2O_3$ , полученной на подложке кремния с пористым слоем, выполнили методом рентгеновской дифрактометрии с использованием характеристического излучения кобальта.

На рис. 1 представлена обзорная дифрактограмма исследованного образца. Хорошо заметно, что на дифрактограмме присутствуют две высокоинтенсивные линии, которые относятся к дифракции от плоскости (111) от монокристаллической подложки. Что касается фазового состава пленки, то, исходя из данных рентгеноструктурного анализа, пленка находится в аморфном состоянии, о чем свидетельствует галообразный фон на малых углах. Кроме того, в области малых углов  $2\theta \sim 23.9^\circ$  (см. вставку к рис. 1) присутствует малоинтенсивная широкая дифракционная линия. Сопоставляя полученные данные с информацией базы данных ICDD, было установлено, что этот брегговский рефлекс однозначно



**Рис. 1.** Результаты рентгеновской дифрактометрии гетерофазной структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$ . На вкладке приведена дифракция от кристаллической фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в области малых углов.



**Рис. 2.** Результаты сканирующей электронной микроскопии скола гетерофазной структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$ .

соответствует дифракционной линии (200), которая является самой сильной линией для фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  centrosymmetric symmetry (карточка ICDD 00-031-0026). Таким образом, можно сделать вывод о зарождении в аморфной пленке кристаллитов фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

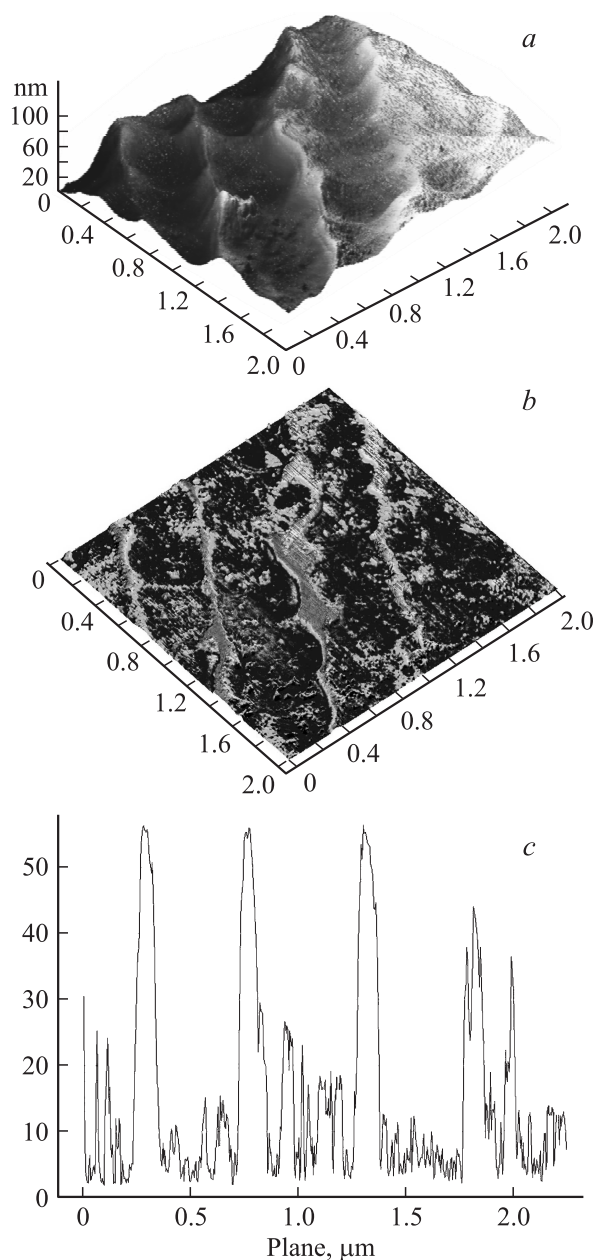
## 2.2. Результаты растровой электронной и атомно-силовой микроскопии (АСМ)

Микроскопия скола гетерофазной структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$ , выполненная с помощью сканирующего электронного микроскопа (рис. 2), позволила уточнить толщины слоев. Хорошо видно, что на 180 нм слое пористого кремния растет пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной  $\sim 120$  нм.

Исследование морфологии и распределения фаз по поверхности образца пористого кремния с осажденными наноразмерными островками оксида алюминия было проведено методом атомно-силовой микроскопии на приборе SOLVER P47 фирмы NT-MDT.

На рис. 3 приведены: *a* — изображение характерного микроучастка образца  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$ , *b* — фазовый контраст, *c* — функция распределения рельефа поверхности образца.

Анализ результатов атомно-силовой микроскопии гетерофазной системы  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$  показывает наличие на ее поверхности двух различных фаз: оксида алюминия (светлые полосы на изображении фазового контраста) и пористого кремния (темный фон). Полосы (нити) оксида алюминия на поверхности пористого кремния достигают нескольких микрометров в длину, при этом их толщина и высота, как правило, не превыша-



**Рис. 3.** Результаты атомно-силовой микроскопии образца  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$ . *a* — изображение характерного микроучастка, *b* — фазовый контраст, *c* — функция распределения рельефа поверхности образца.

ет 50–80 нм. Кроме того, нити  $Al_2O_3$  имеют взаимную ориентацию и упорядоченно расположены на поверхности на расстоянии 300–500 нм друг от друга. Такое взаимное расположение нитей  $Al_2O_3$ , скорее всего, обусловлено кристаллографической ориентацией исходной пластины монокристаллического кремния, используемой для создания пористого слоя, т.е. полученный в результате травления исходной пластины кремния пористый слой задает особенности морфологии осажденного на него впоследствии оксида алюминия.

Следует отметить, что на изображениях наблюдаются отдельные участки диаметром менее 100 нм, которые, возможно, также соответствуют оксиду алюминия.

### 3. Результаты оптической спектроскопии

Оптические свойства пленки оксида алюминия  $Al_2O_3$ , полученной на пористом кремнии, были изучены с использованием методики съемки на отражение в ультрафиолетовом и видимом диапазонах электромагнитного излучения, позволяющей получать информацию от тонких пленок, нанесенных на оптически более плотные и объемные подложки. Электромагнитное излучение проникает через тонкую пленку и, отражаясь от подложки, снова проходит через пленку. Таким образом, мы получаем так называемые спектры отражения–пропускания.

На рис. 4 приведены спектры отражения–пропускания гетерофазной структуры  $Al_2O_3/por-Si/Si(111)$  при углах падения 8 и 45° (рис. 2) градусов. Как видно из полученных результатов (коэффициент отражения–пропускания, форма и характер кривых, наличие интерференции), в области 190–900 нм пленка структуры отлично пропускает электромагнитное излучение.

Необходимость получения спектров отражения–пропускания образца при разных углах падения излучения на пленку заключается в применении для расчетов разработанной нами методики определения дисперсии

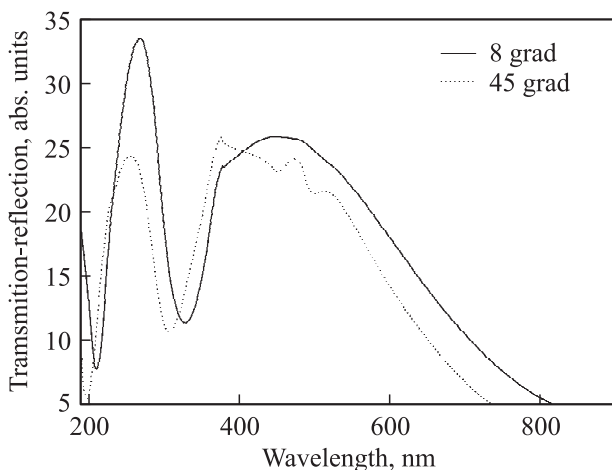


Рис. 4. Спектры отражения–пропускания гетерофазной структуры  $Al_2O_3/por-Si/Si(111)$  в области 190–900 нм.

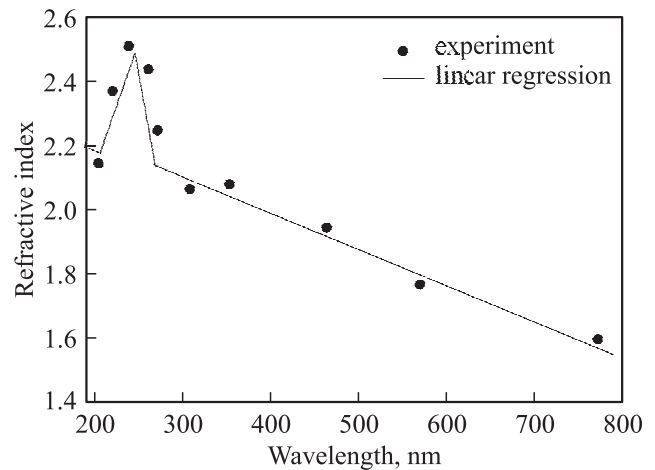


Рис. 5. Дисперсия показателя преломления гетерофазной структуры  $Al_2O_3/por-Si/Si(111)$  в области 190–900 нм.

показателя преломления по интерференционной картине [18], описанной, в том числе, в нашей предыдущей работе [3].

Используя соотношение, связывающее толщину пленки  $d$  и показателя преломления  $n$ ,

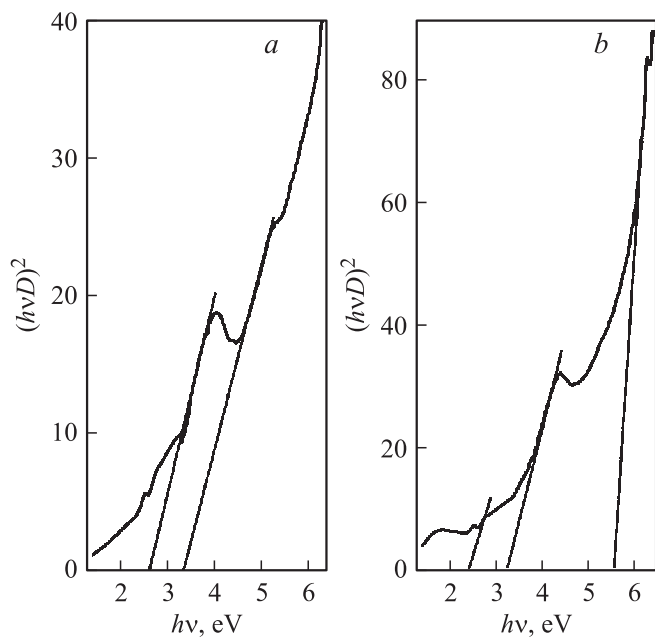
$$d = \frac{N\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)(n^2 - \sin^2 \alpha)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

с использованием данных, полученных из анализа максимумов и минимумов в спектрах отражения–пропускания для двух углов падения, мы можем рассчитать дисперсию показателя преломления для образца. Здесь  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — длины волн максимумов/минимумов интерференции в спектре,  $N$  — порядок интерференции,  $n$  — показатель преломления пленки,  $\alpha$  — угол падения излучения на пленку. При проведении расчета необходимо учесть, что в пределах изменения длины волны показатель преломления изменяется незначительно.

Выбирая различные углы падения, мы можем получить достаточное количество точек для построения дисперсионной зависимости показателя преломления пленки от длины волны. На рис. 5 приведены расчетные значения (точки) показателя преломления для исследованного образца, а также аппроксимированная зависимость.

Хорошо заметно, что величина показателя преломления пленки гетерофазной структуры  $Al_2O_3/por-Si/Si(111)$  растет с уменьшением длины волны, а в области длин волн  $\sim 230$  нм наблюдается резкий скачок показателя преломления (рис. 5). Этот факт может свидетельствовать о близости фундаментального края поглощения пленки  $Al_2O_3$  при указанной длине волны [19,20].

С целью выявления механизмов оптического поглощения в структуре  $Al_2O_3/por-Si/Si(100)$  нами были построены спектры оптического поглощения, полученные как от пленки, так и от используемой подложки



**Рис. 6.** Зависимости  $(Dhv)^2$  от энергии квантов для гетерофазной структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{por-Si/Si}(111)$ , рассчитанные для: *a* —  $\text{por-Si/Si}(111)$ , *b* — пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученная на  $\text{por-Si/Si}(111)$ .

$\text{por-Si/Si}(100)$ . Для этого по вышеописанной методике мы получили спектры пропускания–отражения при максимальном для прибора угле падения излучения на структуру  $67^\circ$ . Далее с использованием возможностей программы Omnic спектр пропускания–отражения был перестроен в спектр поглощения с учетом формулы Ламберта–Бугера:  $T = \exp[-D]$ , где  $T$  — пропускание,  $D$  — оптическая плотность.

Спектр оптического поглощения (отражения–поглощения) сложной гетерофазной структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{por-Si/Si}(100)$  в нашем случае является суперпозицией спектров поглощения отдельных фаз, т. е.  $D = \sum D_i$ . Графический анализ спектров позволил выявить отдельные участки, с линейной зависимостью  $(Dhv)^2$  от энергии квантов, что может указывать на наличие в этой спектральной области прямых разрешенных переходов (рис. 6) Линейная экстраполяция данных участков к нулевому значению позволила определить энергию прямых переходов.

Проведенный анализ дает основания утверждать, что в полученной нами структуре поглощение электромагнитного излучения происходит за счет прямых разрешенных межзонных переходов со значениями энергии  $E_1 = 2.60 \text{ eV}$ ,  $E_2 = 3.25 \text{ eV}$  и  $E_3 = 5.60 \text{ eV}$ . Первые два перехода (присутствующие в обоих спектрах) относятся к прямым разрешенным межзонным переходам, происходящим в слое пористого кремния, в то время как третий переход по своей энергетической величине соответствует ширине запрещенной зоны фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Следует подчеркнуть, что максимум в дисперсии показателя преломления пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , выращенной на  $\text{por-Si}$ ,

совпадает со значением края оптического поглощения, рассчитанного из зависимости  $(Dhv)^2$ , что подтверждает наши предположения о величине ширины запрещенной зоны оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $E_g \approx 5.60 \text{ эВ}$ ).

#### 4. Обсуждение полученных результатов

Обзор современных источников литературы показал, что до нашей работы пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на пористой кремниевой подложке были успешно выращены Fugu Zhong и др. с помощью золь-гель метода [21]. Авторам этой работы удалось показать увеличение интенсивности фотолюминесценции от слоя пористого кремния, покрытого оксидом алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , что весьма перспективно при разработке оптоэлектронных устройств на основе этой системы. Сравнивая литературные данные с результатами, полученными в нашей работе, можно утверждать, что с использованием метода ионно-плазменного распыления на слое пористого кремния также могут быть получены ультратонкие наноструктурированные пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Низкая температура роста ( $\sim 150^\circ\text{C}$ ) позволяет получить пленку оксида алюминия в аморфном состоянии, однако при этом в ее объеме происходит зарождение кристаллитов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  centrosymmetric симметрии.

Необходимо отметить, что пленка оксида алюминия на слое пористого кремния может быть получена в виде ориентированных в одном направлении нитей  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , расположенных на поверхности на расстоянии 300–500 нм друг от друга. Такой механизм роста, скорее всего, обусловлен кристаллографической ориентацией исходной пластины монокристаллического кремния, используемой для создания пористого слоя.

Анализируя данные оптической спектроскопии гетерофазной структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{por-Si/Si}(111)$ , можно с уверенностью говорить о том, что пленка оксида алюминия, полученная методом плазменного распыления, в области 190–900 нм отлично пропускает электромагнитное излучение. Обнаруженный максимум в дисперсии показателя преломления пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , выращенной на  $\text{por-Si}$ , совпадает со значением края оптического поглощения оксида алюминия и расположен в области  $\sim 5.60 \text{ эВ}$ . Этот факт подтверждается результатами расчетов из спектра оптического поглощения гетерофазной структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{por-Si/Si}(111)$ .

Таким образом, на основании комплекса полученных данных можно сделать вывод, что метод ионно-плазменного распыления имеет высокий потенциал при создании в больших масштабах пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на пористой кремниевой подложке. Сформированные на поверхности гетерофазной структуры в виде наноразмерных структурированных нитей пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  могут служить оптическими проводящими каналами и достаточно эффективно внедрены в стандартные технологии, что имеет огромное значение для микро- и оптоэлектроники.

Исследования в части технологии получения диэлектрических пленок  $Al_2O_3$  выполнены в соответствии с государственным заданием ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Работа в части создания пористых подложек, а также диагностики и исследования фундаментальных свойств гетерофазных структур выполнена при поддержке Министерства образования и науки России в рамках государственного задания вузам в сфере научной деятельности на 2014–2016 гг. (проект № 740, задание № 3.130.2014/К).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-32-50159 мол\_нр, а также поддержано грантом президента РФ МК-4535.2014.

## Список литературы

- [1] H.C. Lin, P.D. Ye, G.D. Wilk. Appl. Phys. Lett., **87**, 182 904 (2005).
- [2] Y. Xuan, Y.Q. Wu, H.C. Lin, T. Shen, Peide D. Ye. IEEE Electron Dev. Lett., **28**, 935 (2007).
- [3] П.В. Середин, Д.Л. Голошапов, А.Н. Лукин, А.С. Леньшин, А.Д. Бондарев, И.Н. Арсентьев, Л.С. Вавилова, И.С. Тарасов. ФТП, **48** (11), 1564 (2014) [Semiconductors, **48** (11), 1527 (2014)].
- [4] Dong Lei, Xuegong Yu, Lihui Song, Xin Gu, Genhu Li, Deren Yang. Appl. Phys. Lett., **99**, 052 103 (2011).
- [5] Volker Naumann, Martin Otto, Ralf B. Wehrspohn, Christian Hagendorf. J. Vacuum Sci. Technol. A, **30**, 04D 106 (2012).
- [6] А.С. Леньшин, В.М. Кашкаров, П.В. Середин, Б.Л. Агапов, Д.А. Минаков, В.Н. Ципенюк, Э.П. Домашевская. ЖТФ, **84** (2), 70 (2014) [Technical Physics, **59** (2), 224 (2014)].
- [7] В.М. Кашкаров, А.С. Леньшин, П.В. Середин, Б.Л. Агапов, В.Н. Ципенюк. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **9**, 80 (2012) [J. Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **6** (5), 776 (2012)].
- [8] А.С. Леньшин, В.М. Кашкаров, П.В. Середин, Д.А. Минаков, Б.Л. Агапов, М.А. Кузнецова, В.А. Мошников, Э.П. Домашевская. ФТП, **46** (8), 1101 (2012) [Semiconductors, **46** (8), 1079 (2012)].
- [9] П.В. Середин, В.Е. Терновая, А.В. Глотов, А.С. Леньшин, И.Н. Арсентьев, Д.А. Винокуров, И.С. Тарасов, Н. Leiste, T. Prutskij. ФТТ, **55** (10), 2047 (2013) [Phys. Sol. St., **55** (10), 2161 (2013)].
- [10] П.В. Середин, А.В. Глотов, А.С. Леньшин, И.Н. Арсентьев, Д.А. Винокуров, Т. Prutskij, Н. Leiste, M. Rinke. ФТП, **48** (1), 23 (2014) [Semiconductors, **48** (1), 21 (2014)].
- [11] П.В. Середин, Э.П. Домашевская, В.Е. Терновая, И.Н. Арсентьев, Д.А. Винокуров, И.С. Тарасов, Т. Prutskij. ФТТ, **55** (10), 2054 (2013) [Phys. Sol. St., **55** (10), 2169 (2013)].
- [12] П.В. Середин, А.В. Глотов, В.Е. Терновая, Э.П. Домашевская, И.Н. Арсентьев, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов. ФТП, **45** (4) 488 (2011) [Semiconductors, **45** (4), 481 (2011)].
- [13] P.V. Seredin, A.V. Glotov, E.P. Domashevskaya, I.N. Arsenyev, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov. Physica B — Condens. Matter, **405** (22), 4607 (2010).
- [14] Bietti et al. Appl. Phys. Lett., **103**, 262 106 (2013).
- [15] L. Grenouillet, T. Dupont, P. Philippe, J. Harduin, N. Olivier, D. Bordel, E. Augendre, K. Gilbert, P. Grosse, A. Chelnokov et al. Optical and Quant. Electron., **44**, 527 (2012).
- [16] Y.B. Bolkhovityanov, O.P. Pchelyakov. Usp. Fiz. Nauk, **51**, 437 (2008).
- [17] V. Kashkarov, I. Nazarikov, A. Lenshin, V. Terekhov, S. Turishchev, B. Agapov, K. Pankov, E. Domashevskaya. Phys. Status Solidi (C) Current Topics in Sol. St. Phys., **6** (7), 1557 (2009).
- [18] Ю.И. Уханов. Оптические свойства полупроводников (М., Наука, 1977).
- [19] A.B. Kuzmenko. Rev. Sci. Instrum., **76**, 083 108 (2005).
- [20] V. Lucarini, J.J. Saarinen, K.E. Peiponen, E.M. Vartiainen. *Kramers–Kronig Relations in Optical Materials Research* (Berlin, Springer Verlag, 2005).
- [21] Furu Zhong, Changjun Tie, Xiaoyi Lv, Jiaqing Mo, Zhenhong Jia, Tao Jiang. Adv. Mater. Res., **148–149**, 841 (2011).

Редактор Т.А. Полянская

## Research of nano-sized films $Al_2O_3$ obtained on a nanoporous Si

P.V. Seredin\*, D.L. Goloshchapov\*, A.S. Lenshin\*, A.N. Lukin\*, I.N. Arsenyev<sup>+</sup>, A.D. Bondarev<sup>+</sup>, I.S. Tarasov<sup>+</sup>

\* Voronezh State University,  
394006 Voronezh, Russia  
<sup>+</sup> Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The objective of the paper was to obtain nano-sized  $Al_2O_3$  films on a nanoporous silicon surface as well as to conduct fundamental research of structural, optical and morphological properties of the materials.

The analysis of the results concludes that the use of the method of ion-plasm dispersion on a porous silicon layer can help in obtaining ultrathin nanostructured  $Al_2O_3$  films as equally oriented threads 300–500 nm away from one another. This growth mechanism of aluminium oxide is caused by crystallographic orientation of the initial monocrystal silicon plate used for the porous layer.

The results of optical spectroscopy shows that heterophase structure  $Al_2O_3/por-Si/Si(111)$  is very good at transmitting electromagnetic radiation in the range of 190–900 nm. The established maximum in dispersion of the indicator of the deflection of  $Al_2O_3$  film grown using *por-Si* is consistent with the value of optical dispersion of aluminium oxide and is in the range  $\sim 5.60$  eV. This agrees with the results of the calculation of optical dispersion spectrum of the heterophase structure of  $Al_2O_3/por-Si/Si(111)$ .

The resulting nano-sized structured threads of  $Al_2O_3$  film on the surface of the heterophase structure can be transmitting channels and are quite effective to implement into the standard technologies, which has enormous implications for micro and optoelectronics.