

ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА СЛОЕВ НА КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИНАХ**Н. И. Стаськов^{1*}, Л. И. Сотская²**

УДК 535.32+535.34

¹ Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова, 212022, Могилев, просп. Космонавтов, 1, Беларусь; e-mail: ni_staskov@mail.ru

² Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

(Поступила 30 января 2017)

Предлагаемая модель эффективной среды, в которой матричная среда Максвелла—Гарнетта заполнена средой Бруггемана, применена при решении обратных задач многоугловой эллипсометрии для определения состава переходных слоев, окружающих слой термического диоксида кремния на кремниевой подложке. Объемные факторы заполнения слоя корректно отражают возможные структурные превращения при окислении кристаллического кремния.

Ключевые слова: модель эффективной среды, многоугловая эллипсометрия, слой на подложке, переходные слои, окисление пластин кремния.

The proposed model of an effective medium, in which the Maxwell–Garnett matrix medium is filled with the Bruggeman medium, is used in solving inverse problems of multi-angle ellipsometry to determine the composition of the transition layers surrounding the layer of thermal silicon dioxide on a silicon substrate. The volume factors of filling the layer correctly reflect possible structural transformations during the oxidation of crystalline silicon.

Keywords: effective medium model, multi-angle ellipsometry, substrate layer, transition layers, oxidation of silicon wafers.

Введение. При использовании методов эллипсометрии для исследования наноразмерных диэлектрических слоев на полупроводниковых подложках большая роль отводится получаемой другими прямыми физическими методами информации о структуре поверхности образца, атомарном и кластерном составе приповерхностного слоя, наличии в нем пор и т. д. Это позволяет оптимизировать электродинамическую модель для решения обратных оптических задач [1], удачно задать начальные приближения толщин (d) слоев и их состав. С помощью программного обеспечения современных спектральных эллипсометров [2] тонкие поверхностные слои ($d < 10$ нм) обычно моделируют эффективной двухкомпонентной средой Бруггемана, заполненной на 50 % контактирующими материалами. В этом случае слой не характеризуется показателем преломления. Единственным определяемым параметром модели является толщина. Введение такого однопараметрического переходного слоя значительно уменьшает невязку между измеренными (ψ_e, Δ_e) и рассчитанными (ψ_t, Δ_t) эллипсометрическими углами:

$$\sigma = \min \sum_{i=1}^m [(\psi_t - \psi_e)_i^2 + (\Delta_t - \Delta_e)_i^2].$$

Рабочий интервал углов падения или участок спектра определяет число экспериментальных точек m . В этом интервале экспериментальные погрешности отдельных измерений эллипсометрических углов имеют определенные значения. По величине параметра σ можно сравнивать различные электродинамические модели одного и того же образца [3].

A THREE-COMPONENT MODEL OF AN EFFECTIVE MEDIUM FOR DETERMINING THE COMPOSITION OF LAYERS ON SILICON PLATES

N. I. Staskov^{1*}, L. I. Sotskaya² (¹ A. A. Kuleshov Mogilev State University, 1 Kosmonavtov Prosp., Mogilev, 212009, Belarus; e-mail: ni_staskov@mail.ru; ² Belarusian-Russian State University, Mogilev, Belarus)

Толстые переходные слои ($d > 10$ нм) моделируются трехкомпонентной эффективной средой Бруггемана. Введение, например, такого поверхностного слоя на трехкомпонентном слое поликристаллического кремния (pSi) на порядок уменьшает σ [2]. По данным многоугловой эллипсометрии, трехкомпонентная модель Бруггемана позволяет описать динамику изменения параметров и состава пленок ($d \sim 100$ нм) пористого кремния в зависимости от режимов получения и последующей термообработки [4]. В работе [5] показано, что высокочувствительный неразрушающий метод спектральной отражательной эллипсометрии может применяться для определения эффективного показателя преломления и параметров пористой упорядоченной структуры. Возможность определения двойного лучепреломления таких структур по спектрам пропускания обсуждалась в обзоре [6].

Анализ состава неоднородных слоев [7, 8] показывает, что один или два из трех компонентов среды Бруггемана оказывают наибольшее влияние на оптические свойства этих слоев. Другими словами, неравнозначность трех компонент модели Бруггемана позволяет предположить матричную среду Максвелла—Гарнетта (М-Г).

В работах [9, 10] по данным, полученным методами спектрофотометрии и эллипсометрии, определялся состав и толщина переходных слоев, которые окружают слой диоксида кремния (SiO_2) на термически обработанных кремниевых (cSi) пластинах. Для этого использовались двухкомпонентные среды Бруггемана, М-Г и трехкомпонентная среда Максвелла—Гарнетта—Бруггемана (М-Г-Б). Наименьшая невязка σ , которая указывает на соответствие измеренных и рассчитанных отражательных способностей интерференционного неоднородного слоя SiO_2 на cSi-подложке, получена при использовании трехкомпонентной объединенной модели переходного слоя.

Численное моделирование подложки с шероховатым поверхностным слоем показывает [9], что усложнение модели слоя введением дополнительных параметров уменьшает значение σ и позволяет определить оптические характеристики подложки методом многоугловой эллипсометрии. Если модель образца выбрана некорректно, то один или несколько определяемых электродинамических параметров могут не иметь физического смысла.

В данной работе представлена модель и получено выражение для диэлектрической проницаемости эффективной среды М-Г-Б. В качестве примера применения этой модели сделана попытка определить состав неоднородных слоев на подложках cSi методом многоугловой эллипсометрии.

Для получения структур диоксида кремния на кремнии с заданными электрофизическими параметрами — малым фиксированным зарядом и низкой плотностью поверхностных состояний — используют термическое окисление пластин кристаллического кремния. Реакция взаимодействия кислорода с кремнием протекает в переходном слое, который образуется между кремнием и растущим слоем стехиометрического диоксида [11]. Толщина переходного слоя зависит главным образом от времени окисления. Разрушение монокристаллической структуры кремния приводит к появлению структуры pSi, а так как окисление пластин кремния происходит благодаря диффузии кислорода через нарастающий слой SiO_2 , не исключается наличие пор в переходном слое [7]. Переходный слой между cSi и SiO_2 может содержать разные кремниевые фазы, которые образуются из-за наличия избыточного кремния в оксиде вблизи границы с кремнием [12]. В связи с этим представляет интерес модель переходного слоя, заполненного трехкомпонентной эффективной средой с изотропными наноразмерными частицами.

Теория. В большинстве случаев при решении обратных оптических задач используются двухкомпонентные ($m = 2$) [13] эффективные среды Лорентц—Лоренца

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \sum_{i=1}^m f_i \frac{\varepsilon_i - 1}{\varepsilon_i + 2}, \quad (1)$$

Бруггемана

$$\sum_{i=1}^m f_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon}{\varepsilon_i + 2\varepsilon} = 0 \quad (2)$$

и матричная среда М-Г

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_2}{\varepsilon + 2\varepsilon_2} = f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2}. \quad (3)$$

Объемные доли компонентов должны удовлетворять условию $f_1 + f_2 = 1$. В предельных случаях $f_1 \rightarrow 0$ (или $f_2 \rightarrow 1$) или $f_2 \rightarrow 0$ (или $f_1 \rightarrow 1$) формулы (1)—(3) приводят к одному и тому же результату. Поэтому если известны диэлектрические функции ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) отдельных компонентов, образующих неодно-

родный слой, то ε двухкомпонентной смеси веществ можно найти по выражению [3, 8, 14]:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon^*}{\varepsilon + 2\varepsilon^*} = f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon^*}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon^*} + f_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon^*}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon^*}, \quad (4)$$

которое формально объединяет выражения (1)—(3). Параметр ε^* в выражении (4) учитывает особенности конкретной модели: формула (1) для ε сплошной (дипольной) среды Лорентц-Лоренца может быть получена из (4) при подстановке $\varepsilon^* = 1$; при выборе модели М-Г (3), которая представляет собой сплошную среду с наноразмерными сферическими включениями, необходимо приравнять $\varepsilon^* = \varepsilon$ или $\varepsilon^* = \varepsilon_2$; приближение эффективной среды (2) по Бруггеману может быть получено путем приравнивания $\varepsilon^* = \varepsilon$. Если ε_1 относится к отдельным сферическим включениям, объемная часть которых невелика ($f_1 < 1/3$), а ε_2 — к компоненту, который занимает оставшуюся часть объема (матрица), то для определения ε эффективной среды используют формулу М-Г. При условии $f_1 > 2/3$, среда с ε_1 становится матрицей, а среда с ε_2 — сферическими включениями. При $1/3 < f_1 < 2/3$ понятие матрицы теряет смысл. Фактически в эффективной среде существуют несвязанные наночастицы. Для такой эффективной среды с равноправными компонентами ε_1 и ε_2 , находящимися в среде с ε , используется формула Бруггемана [6, 13]. Приведенный анализ показывает, что комбинация (1)—(3) позволяет получить выражение, которое содержит диэлектрическую проницаемость новой многокомпонентной эффективной среды. В новой формуле должны выполняться предельные переходы.

В случае многокомпонентных переходных слоев формально применимы формулы (1) и (2). При $m > 2$ из (1) легко найти диэлектрическую проницаемость эффективной среды ε . Из (2) при $m = 3$ в поле комплексных чисел получаются три значения диэлектрической проницаемости эффективной среды ε . Это усложняет численное решение обратных задач спектрофотометрии и эллипсометрии. В отдельных случаях [4] мнимой частью диэлектрической проницаемости можно пренебречь.

Рассмотрим трехкомпонентную модель переходных слоев на примере слоя между воздухом и диоксидом кремния.

Предположим, что матричную среду М-Г с ε_2 заполнили эффективной двухкомпонентной ($m = 2$) средой Бруггемана, диэлектрическая проницаемость которой (ε_{eff}) находится из выражения (2). В таком случае объемная доля включений $f_0 + f_1$ и объемная доля матрицы f_2 должны удовлетворять условию $f_0 + f_1 + f_2 = 1$. Диэлектрическая проницаемость ε_{eff} является корнем квадратного уравнения

$$f_0 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_0 + 2\varepsilon_{\text{eff}}} + f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_{\text{eff}}} = 0, \quad (5)$$

которое содержит характеристики двух компонентов ε_0, f_0 и ε_1, f_1 .

После замены ε_1 на ε_{eff} и ε на ε_{01} в выражении (3) получаем

$$(\varepsilon_{01} - \varepsilon_2)(\varepsilon_{01} + 2\varepsilon_2)^{-1} = (f_0 + f_1)(\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_2)(\varepsilon_{\text{eff}} + 2\varepsilon_2)^{-1}.$$

Тогда диэлектрическую проницаемость трехкомпонентной среды М-Г-Б, которая заполняет указанный переходный слой, можно найти по формуле

$$\varepsilon_{01} = \varepsilon_2 \frac{\varepsilon_{\text{eff}}(1 + 2f_0 + 2f_1) + 2\varepsilon_2 f_2}{\varepsilon_{\text{eff}} f_2 + \varepsilon_2(2 + f_0 + f_1)}. \quad (6)$$

Компоненты среды слоя между воздухом и диоксидом кремния характеризуются показателями преломления $N_j = n_j - ik_j = \varepsilon_j^{1/2}$, $j = 0, 1, 2$, и объемными долями f_0, f_1 и $f_2 = 1 - (f_0 + f_1)$. Диэлектрическую проницаемость переходного слоя между cSi и SiO₂ обозначим ε_{12} , компоненты среды этого слоя $N_j^* = n_j^* - ik_j^* = (\varepsilon_j^*)^{1/2}$, соответствующие объемные доли f_0^*, f_1^* и $f_2^* = 1 - (f_0^* + f_1^*)$.

Рассмотрим предельные переходы в выражении (6). Если $f_0 = 0$ (или $f_1 = 0$), то из (5) находим $\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_1$ (или $\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_0$). В таком случае переходный слой оказывается двухкомпонентной средой с ε_2 и ε_1 (или ε_2 и ε_0) и его диэлектрическая проницаемость находится по формуле (6). Если $f_0 = 1$ (или $f_1 = 1$), то $f_1 = f_2 = 0$ (или $f_0 = f_2 = 0$) и $\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_0$ (или $\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_1$). В таком случае переходный слой оказывается однокомпонентным с $\varepsilon_{01} = \varepsilon_0$ (или $\varepsilon_{01} = \varepsilon_1$). Если $f_0 = 0$ и $f_1 = 0$, то $f_2 = 1$ и $\varepsilon_{01} = \varepsilon_2$. В этом случае слой заполнен средой с ε_2 . Таким же образом можно представить трехкомпонентную модель переходного слоя между SiO₂ и cSi с диэлектрической проницаемостью ε_{12} . Индексы 01 и 12 удобны при рассмотрении электродинамической модели исследуемой структуры: воздух (0)—переходный слой (01)—диоксид кремния (1)—переходный слой (12)—кремний (2). Как видно, рассмотренная эффективная среда является матричной трехкомпонентной средой. Этим она отличается, например, от трехкомпонентной среды Бруггемана.

Для определения состава переходных слоев структуры $\text{SiO}_2\text{-cSi}$ необходимо по измеренным эллипсометрическим углам в приближении определенной электродинамической модели численно рассчитать показатели преломления N_0, N_1, N_2 и соответствующие объемные доли компонентов f_0, f_1, f_2 двух переходных слоев. Эту задачу решить будет проще, если предложить состав слоев, т. е. для каждого переходного слоя задать определенные значения N_0, N_1, N_2 , и искать только f_0, f_1, f_2 . Степень применимости моделей эффективной среды для переходных слоев и правильность определения их вещественного состава можно установить путем сравнения рассчитанных и известных оптических характеристик слоя SiO_2 и подложки cSi . Примем во внимание, что из трех объемных долей слоя необходимо численно определить только две. В таком случае обратная оптическая задача содержит 11 неизвестных электродинамических параметров.

Для учета влияния параметров переходных слоев на измеренные эллипсометрические углы мы пытались рассчитать параметры трех электродинамических моделей кремниевых структур: I — однослойная (технологическая) модель с параметрами N_{SiO_2} и d_1 ; II — трехслойная модель, в которой слой с параметрами N_{SiO_2} и d_1 окружен переходными слоями поляризованных диполей с поляризуемостями α_{01} и α_{12} [15]; III — трехслойная модель, в которой слой с параметрами N_{SiO_2} и d_1 окружен переходными слоями, заполненными эффективными средами (6). Толщины переходных слоев d_{01} и d_{12} .

Для расчета обобщенных амплитудных коэффициентов отражения r_p и r_s p - и s -поляризованного света при угле падения φ структуры $\text{SiO}_2\text{-cSi}$, которые входят в основное уравнение эллипсометрии

$$r_p(\varphi)/r_s(\varphi) = \tan\psi(\varphi)e^{i\Delta(\varphi)},$$

использованы рекуррентные соотношения. С их помощью амплитудные коэффициенты отражения каждого следующего слоя выражаются через амплитудные коэффициенты отражения предыдущего слоя, начиная с нижнего слоя на подложке [16]. Это позволило по электродинамическим параметрам выбранных моделей структур $\text{SiO}_2\text{-cSi}$ рассчитать эллипсометрические углы ($\tan\psi(\varphi)$ и $\cos\Delta(\varphi)$) и сравнить их с соответствующими измеренными углами ($\tan\psi_e(\varphi)$ и $\cos\Delta_e(\varphi)$), другими словами — решить прямые и обратные задачи многоугловой эллипсометрии.

Наш подход к численному решению обратных задач спектрофотометрии и эллипсометрии основан на методе наименьших квадратов [17].

Экспериментальные результаты. Эксперименты выполнены на промышленных пластинах КДБ 12, обработанных в буферном растворе после предварительной шлифовки и полировки. Затем пластины подвергались термической обработке (800 °С) в атмосфере газов O_2, N_2 и H_2 в течение 15 (образец 1) и 90 мин (образец 2).

Шероховатости поверхностей обработанных пластин, исследованные на профилометре Talystep (Taylor-Hobson) иглой с радиусом закругления 2 мкм, в отдельных точках не превышали 1 нм (рис. 1). Эти данные позволяют предположить, что на поверхности SiO_2 исследуемых образцов имеются неоднородные слои, частично заполненные воздухом.

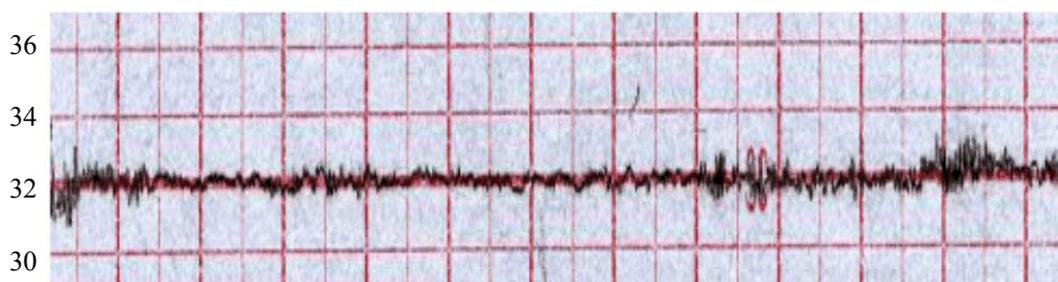


Рис. 1. Участок профилограммы поверхности диоксида кремния, образец 1

Поляризационные углы $\psi_e(\varphi)$ и $\Delta_e(\varphi)$ измерены на стандартном лазерном эллипсометре ЛЭФ 3М-1 ($\lambda = 632.8$ нм) по известной четырехзонной методике при углах падения от 60° до 76° с шагом 1° . В этой области углов падения эллипсометрические параметры обоих образцов (рис. 2, точки) наиболее чувствительны к характеристикам подложки КДБ 12 со слоем SiO_2 .

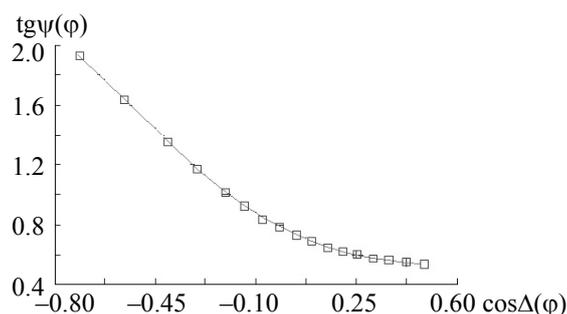


Рис. 2. Связь эллипсометрических параметров образца 2 (модель III)

Для образца 1 на оже-спектрометре РН1 660 (Perkin-Elmer) удалось исследовать распределение концентраций атомов О и Si (C) по нормали, направленной от поверхности вглубь образовавшихся пленок SiO_2 (рис. 3). Его поверхностный слой толщиной 3.4 нм по стехиометрическому составу соответствует оксиду кремния SiO_2 . Между этим слоем и подложкой находится неоднородный переходный слой ($d_{12} = 4.4$ нм). При послойном распылении диоксида кремния ионами Ag^+ происходит электризация толстых диэлектрических пленок. Это не позволяет провести подобные измерения для образца 2.

Рассмотрены разные варианты возможного состава поверхностного и переходного слоев образцов 1 и 2. На основании данных рис. 1 и 3 считалось, что в слое могут присутствовать три из пяти компонентов: αSi , $c\text{Si}$, SiO_2 , материал подложки (КДБ 12) и воздушные поры. Оптические характеристики кремниевых фаз приведены в справочнике [18]. Оптимальный состав этих слоев соответствует случаю, когда невязка (последняя строка табл. 1) между измеренными (точки) и рассчитанными (кривая) эллипсометрическими углами (рис. 2) является минимальной.

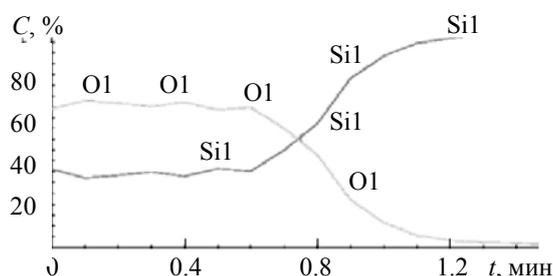


Рис. 3. Распределение атомов О и Si по толщине слоя SiO_2

В табл. 1 приведены параметры моделей I—III, полученные при решении обратных задач многоугловой эллипсометрии для двух образцов структуры SiO_2 — $c\text{Si}$. Суммарная толщина $d_{01} + d_1 + d_{12}$ (модель III, образец 1) поверхностного слоя на пластине КДБ 12, которая окислялась в течение 15 мин, составляет 11.1 нм. По данным метода спектральной эллипсометрии [9], толщина этого слоя 8.8 нм. Суммарная толщина всего поверхностного слоя по данным оже-спектроскопии ~ 10 нм. Из-за структурной неоднородности переходных слоев воздух—диоксид кремния и диоксид кремния—кристаллический кремний оптические характеристики термического слоя SiO_2 $n_1 = 1.45$ и $k_1 = 0.025$ и оптические характеристики $c\text{Si}$ (модель I) имеют смысл эффективных характеристик.

Параметры модели II учитывают неоднородности переходных слоев при определении характеристик слоя SiO_2 и подложки $c\text{Si}$.

По рассчитанным параметрам модели III можно заключить, что на поверхности слоя SiO_2 первого образца имеется неоднородный слой, заполненный на 43 % воздухом, на 56 % диоксидом кремния с показателем преломления $N_{\text{SiO}_2} = 1.453 - i0.003$ и на 1 % аморфным кремнием. Эффективный показатель преломления этого слоя, рассчитанный по формуле (6), $N_{01} = 1.29 - i4.8 \cdot 10^{-3}$. Переходный слой между SiO_2 и $c\text{Si}$ этого образца содержит 60 % диоксида кремния с N_{SiO_2} , 34 % материала подложки КДБ 12 и 6 % аморфного кремния. При численных расчетах в качестве первых приближений объемных долей компонентов использованы данные, полученные методом спектральной эллипсометрии [9]. Эффективный показатель преломления слоя $N_{12} = 2.32 - i0.003$.

Т а б л и ц а 1. Параметры образцов 1 и 2

Модель	I	II	III
<i>Образец 1</i>			
Поверхностный слой		$\alpha_{01} = -0.012$ нм	$d_{01} = 1.7$ нм; $f_0 = 0.43$; $f_1 = 0.56$; $f_2 = 0.01$
SiO ₂	$N_{\text{SiO}_2} = 1.45 - i0.025$ $d_1 = 9.6$ нм	$N_{\text{SiO}_2} = 1.46 - i10^{-4}$ $d_1 = 3.9$ нм	$N_{\text{SiO}_2} = 1.453 - i0.003$ $d_1 = 3.9$ нм
Переходный слой		$\alpha_{12} = 0.098$ нм	$d_{12} = 5.5$ нм; $f_0^* = 0.60$; $f_1^* = 0.34$; $f_2^* = 0.06$
Подложка	$N_{\text{cSi}} = 3.81 - i0.013$	$N_{\text{cSi}} = 3.83 - i0.024$	$N_{\text{cSi}} = 3.83 - i0.018$
Невязка	$5.1 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$
<i>Образец 2</i>			
Поверхностный слой		$\alpha_{01} = -0.81$ нм	$d_{01} = 4.2$ нм; $f_0 = 0.46$; $f_1 = 0.52$; $f_2 = 0.02$
SiO ₂	$N_{\text{SiO}_2} = 1.46 - i10^{-4}$ $d_1 = 932.0$ нм	$N_{\text{SiO}_2} = 1.457 - i10^{-4}$ $d_1 = 933.5$ нм	$N_{\text{SiO}_2} = 1.46 - i10^{-4}$ $d_1 = 927.7$ нм
Переходный слой		$\alpha_{12} = -0.09$ нм	$d_{01} = 7.7$ нм; $f_0^* = 0.49$; $f_1^* = 0.40$; $f_2^* = 0.11$
Подложка	$N_{\text{cSi}} = 3.97 - i0.011$	$N_{\text{cSi}} = 3.83 - i0.017$	$N_{\text{cSi}} = 3.83 - i0.018$
Невязка	$8.4 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$

С увеличением времени нагревания кремниевых пластин увеличивается толщина переходных слоев и изменяются объемные доли компонентов. Однако состав слоев не изменяется. Рост содержания в переходных слоях аморфного кремния с увеличением времени нагревания кремниевых пластин указывает на повышение плотности слоев. Для второго образца эффективный показатель преломления верхнего слоя, рассчитанный по формуле (6), $N_{01} = 1.33 - i9.5 \cdot 10^{-3}$. При увеличении времени нагревания кремниевых пластин в переходном слое между SiO₂ и cSi почти вдвое повышается содержание аморфного кремния и его эффективный показатель преломления возрастает до $N_{12} = 2.61 - i0.04$. При численных расчетах в качестве первых приближений объемных долей компонентов в переходном слое использованы данные, полученные методом спектроскопии [10].

Заключение. Результаты расчетов параметров двух образцов структуры термической диоксид кремния—кристаллический кремний с использованием трех электродинамических моделей показывают, что предложенная трехкомпонентная модель эффективной среды Максвелла—Гарнетта—Бруггемана позволяет учесть влияние параметров переходных слоев на измеряемые эллипсометрические углы и оценить состав этих слоев. С увеличением времени обработки пластин увеличивается не только толщина верхнего переходного слоя, но и содержание в нем пор и аморфного кремния. Неоднородности поверхности этого слоя могут приводить к росту световых потерь, величина которых зависит от количественного содержания поглощающего аморфного кремния. В переходном слое между диоксидом кремния и подложкой с увеличением времени термообработки пластин уменьшается содержание диоксида кремния, повышается содержание материала подложки и аморфного кремния. Эффективные показатели преломления, определенные по показателям преломления трех компонентов в слое и их объемным факторам заполнения, качественно отражают возможные структурные преобразования в приповерхностном слое пластины при увеличении времени окисления.

Работа выполнена при поддержке государственной программы научных исследований Республики Беларусь “Фотоника, опто- и микроэлектроника 1.3.03” (2016—2017 гг.).

- [1] А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. Методы решения некорректных задач, Москва, Наука (1975)
 [2] <http://www.horiba.com/scientific/products/ellipsometers/spectroscopic-ellipsometers/uvisel/uvisel-spectroscopic-ellipsometer-covering-a-range-from-fuv-to-nir-640/>
 [3] Н. Г. Tompkins, E. A. Irene. Handbook of Ellipsometry, William Andrew Publishing & Springer (2005)
 [4] Е. В. Астрова. ФТП, 33, № 10 (1999) 1264—1270
 [5] С. Е. Козик. Неразрушающий контроль и диагностика, № 2 (2015) 67—77
 [6] Л. А. Головань. УФН, 177, № 6 (2007) 619—638

-
- [7] **T. E. Benson.** *J. Electron. Mater.*, **25**, N 6 (1996) 955—964
- [8] **D. E. Aspnes.** *Thin Solid Films*, **89** (1982) 249—262
- [9] **Н. И. Стаськов.** Проблемы физики, математики и техники, № 2 (15) (2013) 18—24
- [10] **Н. И. Стаськов.** Проблемы физики, математики и техники, № 4 (25) (2015) 31—37
- [11] **А. И. Дусь.** ФТП, **42**, № 11 (2008) 1400—1406
- [12] **В. А. Гриценко.** УФН, **179**, № 9 (2009) 921—930
- [13] **В. К. Милославский, Е. Д. Маковецкий, Л. А. Агеев, К. С. Белошенко.** *Опт. и спектр.*, **107**, № 5 (2009) 854—859
- [14] **P. H. Roussel, J. Vanhellefont, H. E. Maes.** *Thin Solid Films*, **234** (1993) 423—427
- [15] **В. И. Пшеницын, М. И. Абаев, Н. Ю. Лызлов.** *Эллипсометрия в физико-химических исследованиях*, Москва, Химия (1986)
- [16] **М. Борн, Э. Вольф.** *Основы оптики*, пер. с англ., Москва, Наука (1970)
- [17] **А. Б. Сотский.** Материалы Всерос. науч. интернет-конф. с междунар. участием “Спектрометрические методы анализа”, Казань, 26 сентября 2013 г., 103—107
- [18] **E. D. Palik.** *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press (1988)