

# Особенности совместной диффузии бора и гадолиния в кремний из наноразмерных гибридных органо-неорганических пленок

© И.В. Смирнова\*<sup>¶</sup>, О.А. Шилова\*<sup>¶</sup>, В.А. Мошников<sup>+</sup>, А.Е. Гамарц<sup>+</sup>

\* Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук,  
199034 Санкт-Петербург, Россия

<sup>+</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,  
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 26 марта 2009 г. Принята к печати 6 апреля 2009 г.)

Методом золь-гель технологии получены наноразмерные органо-неорганические пленки, которые используются в качестве усовершенствованных источников диффузии бора и гадолиния в кремний. С помощью вторичной ионной масс-спектрометрии исследованы особенности диффузионных профилей распределения бора при его раздельной и совместной с гадолинием диффузии из полученных пленок. Составлена программа и проведено численное моделирование, обеспечившее адекватное описание сложных участков экспериментально полученных диффузионных профилей бора. Предложена модель, учитывающая перераспределение бора между стекловидной пленкой и оксидным слоем, что позволило найти оптимальные значения коэффициентов диффузии бора, при которых наблюдается наилучшее соответствие между экспериментальными и расчетными результатами.

PACS: 81.07.Pr, 81.20.Fw, 61.72.sh

## 1. Введение

Диффузия бора, а также совместная диффузия бора и редкоземельных элементов в полупроводниковые материалы (например, кремний) остаются актуальными процессами для полупроводниковой технологии на протяжении нескольких десятков лет [1–8]. Для проведения процесса диффузии используются различные методы, в том числе методы диффузии из жидкого источника, методы ионной имплантации [1,2–5,9,10]. Золь-гель-метод является одним из современных способов, позволяющих создавать источники диффузии, так называемые пленки „spin-on glass“, для получения малодефектных диффузионных слоев, в том числе легированных редкоземельными элементами, введение которых другими методами затруднительно или невозможно [3,6,7,11]. Весьма эффективно применять этот способ диффузии при необходимости введения в полупроводник сразу нескольких легирующих примесей, а также для формирования в кремний глубоких ( $\sim 3$ – $10$  мкм) диффузионных областей. Например, этим способом можно добиться повышения радиационной устойчивости полупроводниковых приборов при легировании редкоземельными элементами, а также получать разделительные изолирующие стоп-слои для анизотропного травления тонкостенных кремниевых мембран в цикле изготовления сенсоров, датчиков давления и влажности, датчиков расхода топлива и др. [2,3,8,12,13]. Введение редкоземельного элемента гадолиния призвано уменьшить искажение кристаллической решетки полупроводника [13–15], повысив тем самым механическую прочность формируемой мембраны.

Для повышения воспроизводимости толщины формируемой кремниевой мембраны и обеспечения гладкости ее поверхности используют прием так называемого „слоп-слоя“. Стоп-слои — это специально формируемые в кремнии области, концентрация легирующего элемента (например, бора) в которых должна быть не менее  $10^{18}$ – $10^{19}$  ат/см<sup>3</sup> [19–18]. Когда селективный травитель достигает этой высоколегированной области, скорость травления резко замедляется, тем самым обеспечивается требуемая толщина формируемой мембраны.

Чтобы достигнуть высокой концентрации легирующей примеси, необходимо использовать пленки с высоким содержанием бора  $\sim 40$  масс% В<sub>2</sub>О<sub>2</sub> (в пересчете на оксид в силикатной пленке). При этом очень важно, чтобы пленки не обеднялись и оставались постоянным источником легирующей примеси в течение всего процесса диффузии. Для обеспечения этих требований мы разработали новые гибридные золи, содержащие органические добавки (высокомолекулярные олигомеры линейного и разветвленного строения) [12,19].

Создание гибридных золь-гелей позволило увеличить толщину формируемых пленок до максимально возможной для таких высоколегированных покрытий ( $\sim 150$ – $200$  нм) и воспроизводимо получать в кремнии слои глубиной  $\sim 2.5$ – $3.5$  мкм с концентрацией бора  $\geq 5 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup> [12,20,21].

Используя традиционные в микроэлектронике методы определения концентрации легирующей примеси в объеме образца, а также метод вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС), нами были определены диффузионные характеристики золь-гель гибридных и силикатных пленок, содержащих бор и гадолиний [12,13,22–24]. Однако обычно используемый алгоритм расчета поверхностной концентрации и коэффициентов диффузии,

<sup>¶</sup> E-mail: laich@isc.nw.ru

<sup>¶¶</sup> E-mail: vytt@mail.ru

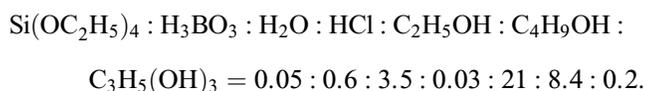
основанный на применении законов Фика и распределения Гаусса [1,2,18], применим только для отдельного определения этих параметров — для каждой из примесей в отдельности. В то же время данные распределения примесей в кремнии, полученные по методу ВИМС, указывали на несомненное влияние на параметры диффузии не только каждого легирующего элемента, но органической составляющей используемых пленок [13,23,24]. Поэтому представлялось интересным определить параметры полупроводниковых структур, полученных диффузией В и Gd из гибридных пленок, для каждого из возможных механизмов диффузии и определить наиболее вероятный из них.

## 2. Методы и подходы реализации эксперимента

Необходимость введения в золи больших количеств легирующих примесей — борной кислоты и нитрата гадолиния, с целью получить источники диффузии В и Gd максимальной мощности, привела нас к идее использования хорошо растворимых в гомогенной среде золь полиолов различного молекулярного веса и топологии [6,11–13,19,22,23].

Модифицируя золи на основе тетраэтоксисилана (ТЭОС) и борной кислоты рядом водорастворимых полиолов линейного и разветвленного строения, удалось решить непростую, но крайне важную проблему увеличения толщины высоколегированных боросиликатных покрытий (состава  $40\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 60\text{SiO}_2$  масс%) без ухудшения качества их поверхности [6,12,13,20,24].

Высокомолекулярные добавки были выбраны исходя из их способности растворяться в водно-спиртовой среде золь и взаимодействовать с продуктами гидролиза ТЭОС, благодаря наличию в них гидроксильных ОН или уретановых  $-\text{NH}-\text{C}-$  групп. Одна из таких добавок, содержащих как уретановые, так и гидроксильные группы, — полигидроксилигоуретаномочевина разветвленного строения (ПОУМ). Молекулярная масса ( $MM$ ) этого олигомера составляет 4200 г/моль. Кроме ПОУМ в борсодержащие золи вводились полиэтиленгликоль (ПЭГ) линейного строения,  $MM = 300$  г/моль, а также четырехлучевой гиперразветвленный олигомер (ГРП). ГРП, используемый нами в качестве органических модификаторов золь-гель-систем, представляет собой гиперразветвленный алифатический сложный полиэфирполиол. Расчетное значение средневесового молекулярного веса равно 5100 г/моль. При этом на оболочке молекулы находится примерно 64 ОН-группы [12,19]. Все выбранные добавки в количестве порядка 1 масс% вводились в золи со следующим мольным соотношением исходных компонентов:



Количество борной кислоты и нитрата гадолиния варьировалось и вводилось из расчета получить силикатные пленки следующих составов:  $40\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 60\text{SiO}_2$  масс%,  $5\text{Gd}_2\text{O}_3 \cdot 95\text{SiO}_2$  масс%,  $10\text{Gd}_2\text{O}_3 \cdot 90\text{SiO}_2$  масс%,  $40\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{Gd}_2\text{O}_3 \cdot 55\text{SiO}_2$  масс%,  $40\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{Gd}_2\text{O}_3 \cdot 50\text{SiO}_2$  масс%.

### 2.1. Формирование пленок

Из полученных золь на поверхности кремниевых пластин марки КЭФ-20, ориентированных в кристаллографической плоскости  $\langle 100 \rangle$ , с удельным сопротивлением в плоскости пластин  $20 \text{ Ом}/\square$ , диаметром 76 мм, методом центрифугирования формировались тонкие кремнийорганические слои. Скорость вращения центрифуги составляла 2500 оборотов в мин.

Термическую обработку кремниевых подложек с нанесенными на них пленками проводили при температуре  $800^\circ\text{C}$  в течение 15 мин в электрической печи с кварцевым реактором (Еурога 2000). Точность поддержания температуры в центральной части печи (площадка  $\sim 20$  см) составляет  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Термический отжиг проводили в атмосфере кислорода, средний расход газа составлял 80–100 л/ч.

Диффузия бора и гадолиния из силикатных стекловидных пленок, содержащих эти легирующие примеси, в кремний осуществлялась при температуре  $1150^\circ\text{C}$  в атмосфере азота в течение 40 мин.

## 3. Методы исследования

Послойное распределение легирующих примесей бора и гадолиния по глубине залегания было получено методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на установке IMS-4f CAMECA. Регистрировался сигнал положительных вторичных ионов при бомбардировке первичными ионами  $\text{O}_2^+$  с энергией 10 кэВ и током 1.0 мкА. Первичный пучок разворачивался на поверхности образца в растр размером  $250 \times 250$  мкм. Вторичные ионы отбирались из центральной области кратера травления диаметром 60 мкм.

Использование возможностей метода ВИМС позволяет более глубоко проследить поведение легирующего элемента бора и редкоземельного элемента гадолиния в объеме полупроводника, исследовать характер их распределения.

## 4. Современные представления о механизмах легирования полупроводников из многокомпонентных источников диффузии

В научной литературе существует два подхода, объясняющих положительное влияние атомов редкоземельных элементов с большим радиусом ядра (например,

гадолиний), введенных в кремний совместно с атомами другого элемента, радиус атомов которого меньше радиуса атома самого кремния (например, бор).

Первый подход объясняет такой эффект результатом совместного диффундирования атомов бора и гадолиния: образуется пара, где маленький бор „тянет“ за собой большой гадолиний, прокладывая ему путь в глубь полупроводника [2,14]. Одновременная диффузия атомов и с большими — гадолиний, и с меньшими размерами — бор (по сравнению с основными атомами кремния) позволяет путем компенсации напряжений удерживать уровень напряжений ниже величины, вызывающей создание дислокации [14], что положительно сказывается на механической прочности структур, формируемых из кремния в дальнейшем.

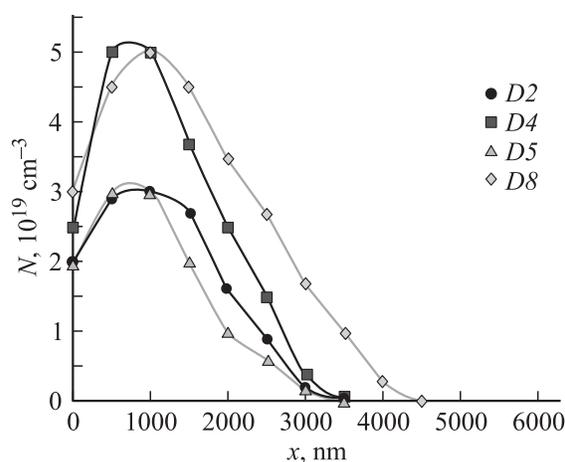
Второй подход опирается на особенности легированных окисных пленок, получаемых из зольей, и их способность в процессе диффузии геттерировать атомы быстродиффундирующих металлов (Cu, Au, Fe, Ni и др.). Для геттерирования нежелательных примесей необходимо, чтобы на поверхности полупроводника была создана жидкая фаза, хорошо растворяющая эти примеси и не содержащая их к моменту геттерирования [2,3]. Из диаграммы состояния [1] системы  $B_2O_3-SiO_2$  видно, что в области температур 1000–1300°C и концентрации  $B_2O_3 \sim 7-40$  масс% система находится в жидком состоянии и может быть использована в качестве геттера.

Анализ результатов, полученных традиционными методами, применяемыми в микроэлектронике для измерения сопротивления и глубины залегания диффузионного слоя, позволяет утверждать, что механизм взаимодействия бора и гадолиния при их совместной диффузии подтверждает верность первого подхода. В работах [12,21] показано, что, на основании расчетов [14,25–27] поверхностной концентрации бора при известных величинах глубины залегания диффузионного слоя и поверхностного сопротивления, использование пленок — источников совместной диффузии бора и гадолиния позволяет создать в кремнии диффузионные слои с высокой концентрацией примеси бора более  $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . С помощью созданных диффузионных слоев были сформированы механически прочные тонкостенные кремниевые мембраны (выход годных изделий — 100%) заданной толщины ( $d = 2.5-3.5$  мкм) для газовых сенсоров [24].

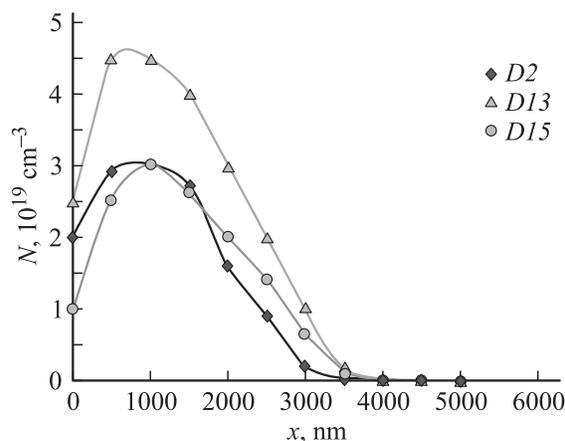
Однако, по данным [12,13,21], можно говорить о влиянии состава и длительности процесса на полученные результаты, но сложно сказать о механизмах диффузии, приводящих к этим результатам. Представления об идеальном источнике диффузанта неограниченной мощности не учитывают хода кривых реальных профилей распределения, их отклонение от рассчитанных по упрощенным формулам моделей и перераспределение примеси в оксид, образующийся на границе раздела пленка—подложка.

## 5. Особенности диффузионных профилей распределения бора (исходя из данных, полученных методом ВИМС)

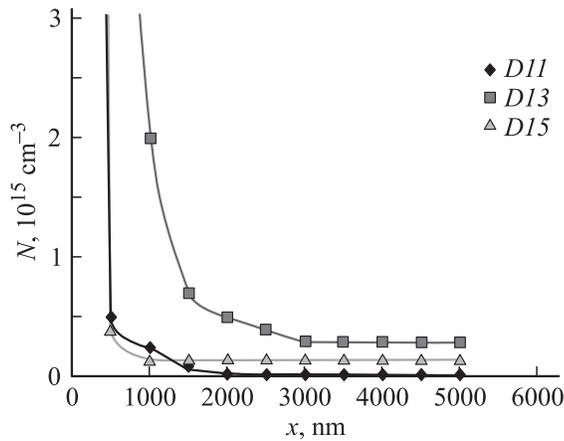
Как видно из рис. 1 и 2, профили распределения бора имеют особенности: максимум концентрации находится не на поверхности образца, а на некотором расстоянии от нее. Таким образом, концентрация бора на поверхности меньше, чем концентрация в максимуме. Кроме того, концентрация бора на достаточно протяженном участке по глубине меняется незначительно (формируется „плато“, по всему участку которого концентрация бора остается практически постоянной). Модель для расчета коэффициентов диффузии, описанная в [1–3,14,15,18], которая выбрана исходя из предположения, что процесс введения легирующей примеси происходит из источника



**Рис. 1.** Профили распределения концентрации бора по глубине его залегания в пленках: D2 — боросиликатной, не содержащей органических добавок; D4 — с добавкой ПОУМ; D5 — с добавкой ПЭГ; D8 — с добавкой ГРП.



**Рис. 2.** Профили распределения концентрации бора по глубине его залегания в боросиликатных пленках: D2 — без органических добавок; D13 — с содержанием 5 масс%  $Cd_2O_3$ ; D15 — с содержанием 10 масс%  $Cd_2O_3$ .



**Рис. 3.** Профили распределения концентрации гадолиния по глубине его залегания в пленках: *D11* — силкатной с содержанием 10 масс%  $\text{Cd}_2\text{O}_3$ ; *D13* — боросилкатной с содержанием 5 масс%  $\text{Cd}_2\text{O}_3$ ; *D15* — боросилкатной с содержанием 10 масс%  $\text{Cd}_2\text{O}_3$ .

постоянной мощности, не полностью описывает характер распределения легирующей примеси бора на всех участках диффузионного профиля, а подходит лишь для описания центральной его части.

Особенности диффузионных профилей распределения бора могут быть объяснены в рамках следующей модели: в процессе диффузии на поверхности кремниевой пластины происходит процесс термического окисления с образованием слоя  $\text{SiO}_2$ , который начинается при температуре около  $900^\circ\text{C}$  [1], и часть бора при диффузии из боросилкатной пленки диффундирует в этот образовавшийся оксидный слой. Слой  $\text{SiO}_2$  будет иметь небольшую толщину, но за счет большого коэффициента сегрегации бора в системе  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  содержание бора в оксидном слое может быть весьма значительным. Для подтверждения высказанных предположений был проведен численный расчет профиля диффузии в системе  $\text{Si}-\text{SiO}_2$ , основанный на математической модели, изложенной в следующем разделе.

Профили распределения гадолиния по глубине залегания приведены на рис. 3. Они существенно отличаются от профилей распределения бора по виду и по физике процесса легирования, что объясняется разницей размеров атомов ( $\text{B} - 0.097 \text{ нм}$ ,  $\text{Gd} - 0.179 \text{ нм}$ ). Концентрация гадолиния, имея достаточно высокие значения у поверхности, резко уменьшается и на глубине  $\sim 2000 \text{ нм}$  составляет  $10^{13}-10^{14} \text{ ат/см}^3$ . Далее концентрация еще немного падает и после  $3000 \text{ нм}$  практически постоянна.

## 6. Математическая модель расчета диффузионного профиля бора

Для определения концентрации примеси в заданный момент времени необходимо решить второе уравнение

Фика [2,3,13]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}.$$

В данной задаче для этой цели был использован метод численного решения дифференциального уравнения Фика на сетке [25,26]. Суть метода заключается в разбиении интервалов по времени  $t$  и координате  $x$  на отдельные участки — введением сетки и нахождением производных концентрации между соседними точками по следующим приближенным формулам:

$$\frac{dC_i}{dt} \approx \frac{C_{i-1}C_i}{\Delta t},$$

$$\frac{d^2C_i}{dx^2} \approx \frac{-3C_i + 4C_{i+1} - C_{i+2}}{2x^2},$$

$$\frac{d^2C_i}{dx^2} \approx \frac{C_{i-1} - 2C_i - C_{i+1}}{2x^2},$$

$$\frac{d^2C_i}{dx^2} \approx \frac{C_{i-2} - 4C_{i-1} + 3C_i}{2x^2}.$$

Образование оксидного слоя моделировалось добавлением дополнительных узлов сетки. При этом распределение бора в оксиде, учитывая незначительную толщину слоя оксида, считалось однородным.

В ходе расчетов проводилось определение теоретического профиля диффузии при произвольно заданных параметрах (начальной концентрации  $C_0$ , коэффициенте диффузии  $D$  и толщине оксидного слоя  $h$ ) и осуществлялось его сравнение с экспериментальными результатами, рассчитанными по методу наименьших квадратов [26,27]. На основании этого сравнения проводилась коррекция параметров расчета до тех пор, пока не было достигнуто наилучшее согласование между теоретическими и экспериментальными данными.

Расчет диффузионных параметров с помощью данной математической модели проводился только для профилей распределения бора. Коэффициент сегрегации легирующей примеси находили из диаграммы состояния  $\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ .

## 7. Анализ результатов, полученных с применением графической объектно-ориентированной среды Labview

Для реализации описанной выше математической модели была создана специальная программа с использованием графической объектно-ориентированной среды Labview-6.0 [24].

Пример расчета концентрационных кривых бора, полученных с использованием описанной программы, приведен на рис. 4. Как видно из рисунка, рассчитанная теоретическая кривая  $I$  достаточно хорошо описывает экспериментально полученный профиль диффузии  $3$  в

Диффузионные параметры бора при диффузии из боросиликатных и гадолиний-боросиликатных органо-неорганических пленок

№ образца	Состав пленки (по синтезу), масс%	Начальная концентрация бора, * см <sup>-3</sup>	Коэффициент диффузии, см <sup>2</sup> /с	
			бора*	бора**
1	40B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 60SiO <sub>2</sub>	3.7 · 10 <sup>21</sup>	3.7 · 10 <sup>-12</sup>	2.1 · 10 <sup>-12</sup>
2	40B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 60SiO <sub>2</sub> + ПЭГ	3.7 · 10 <sup>21</sup>	3.45 · 10 <sup>-12</sup>	3.3 · 10 <sup>-12</sup>
3	40B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 60SiO <sub>2</sub> + ПОУМ	5.3 · 10 <sup>21</sup>	3.85 · 10 <sup>-12</sup>	2.1 · 10 <sup>-12</sup>
4	40B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 60SiO <sub>2</sub> + ГРП	6.03 · 10 <sup>21</sup>	4.95 · 10 <sup>-12</sup>	2.5 · 10 <sup>-12</sup>
5	40B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 55SiO <sub>2</sub> · 5Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.9 · 10 <sup>21</sup>	4.65 · 10 <sup>-12</sup>	2.5 · 10 <sup>-12</sup>
6	40B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 50SiO <sub>2</sub> · 10Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.2 · 10 <sup>21</sup>	4.01 · 10 <sup>-12</sup>	1.8 · 10 <sup>-12</sup>

Примечание. \* Представлены результаты, полученные с помощью графической объектно-ориентированной среды Labview. \*\*. Для сравнения приведены также данные, полученные с использованием модели диффузии из постоянного источника.

отличие от модели диффузии из постоянного источника (кривая 2).

По указанной в предыдущем разделе методике были определены параметры диффузионного процесса для случаев диффузии из боросиликатных стекловидных пленок состава 40B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 60SiO<sub>2</sub> масс% с добавлением органических модификаторов, а также пленок составов 40B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 55SiO<sub>2</sub> · 5Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> масс% и 40B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 50SiO<sub>2</sub> · 10Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> масс% при совместной диффузии бора и редкоземельного элемента гадолиния. Эти параметры представлены в таблице. Для сравнения представлены также данные, полученные с использованием модели диффузии из постоянного источника.

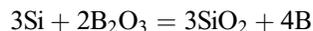
Как видно из таблицы наибольшее значение коэффициента диффузии бора, а следовательно, и наибольшую степень легирования можно получить, используя в качестве источника диффузии гибридную органо-неорганическую боросиликатную пленку, полученную из золя с добавлением ГРП в количестве ~ 1 масс%, а также при использовании боросиликатной пленки, содержащей второй неорганический легирующий элемент — гадолиний в количестве 5 масс%. Полученные расчетные

значения коэффициентов диффузии бора совпадают с известными литературными данными [1,18].

## 8. Заключение

Используя метод вторичной ионной масс-спектрометрии, были изучены особенности протекания процесса реакционной диффузии бора и гадолиния из силикатных и гибридных пленок, получаемых методом золь-гель-технологии. Показано, что использование боросиликатных гибридных органо-неорганических пленок позволяет увеличить мощность источников диффузанта, это особенно заметно при введении органических модифицирующих добавок как разветвленного (ПОУМ), так и гиперразветвленного (ГРП) строения в количестве 1 масс%.

В работе предложена модель, составлена программа и проведено численное моделирование с использованием графической объектно-ориентированной среды Labview, обеспечившее адекватное описание сложных экспериментально наблюдаемых зависимостей. Предложенная модель учитывает протекание на границе пленка-подложка химической реакции



и перераспределение бора между стекловидной пленкой и оксидным слоем, что позволило найти оптимальные значения коэффициентов диффузии бора, при которых наблюдается наилучшее соответствие между экспериментальными и расчетными результатами.

С помощью составленной программы были рассчитаны основные диффузионные параметры: начальная концентрация бора в образце и коэффициент диффузии бора. Установлен факт замедления процесса диффузии бора при его совместном введении с гадолинием.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-08-13547-офи\_ц), гранта Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ (грант НШ-9858.2006.3), гранта Фонда содействия отечественной науке за 2008 г.

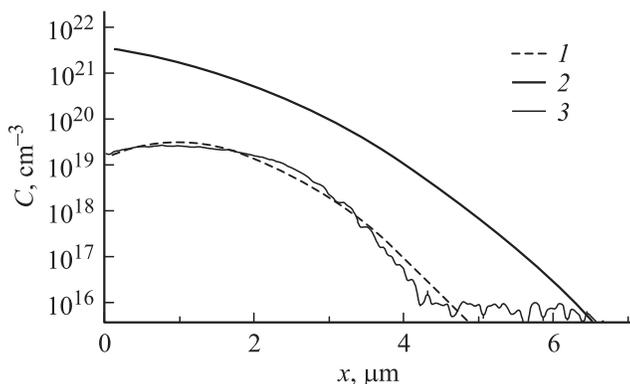


Рис. 4. Кривые распределения концентрации бора по глубине его залегания, полученные: 1 — с использованием графической объектно-ориентированной программы Labview; 3 — при условии перераспределения примеси в оксид, образующийся на границе раздела пленка-подложка (результаты ВИМС); 2 — исходя из предположения, что процесс введения легирующей примеси происходит из источника постоянной мощности.

## Список литературы

- [1] З.Ю. Готра. *Технология микрoэлектронных устройств*. Справочник (М., Радио и связь, 1991).
- [2] В.В. Новиков. *Теоретические основы микрoэлектроники*. Учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов (М., Высш. шк., 1972).
- [3] А.И. Борисенко, В.В. Новиков, Н.Е. Приходько, И.М. Митникова, Л.Ф. Чепик. *Тонкие неорганические пленки в микрoэлектронике* (Л., Наука, 1972).
- [4] О.В. Александров, А.О. Захарьин, Н.А. Соболев. ФТП, **39** (7), 776 (2005).
- [5] В.Г. Лифшиц. СОЖ, № 2, 107 (1997).
- [6] О.А. Шилова. Физика и химия стекла, **31** (2), 270 (2005).
- [7] В.А. Мошников, О.А. Шилова. *Золь-гель технология наноструктурированных материалов*. Серия: *Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы*, под ред. В.В. Лучинина, Ю.М. Таирова (М., Физматлит, 2006) с. 205.
- [8] Ю.З. Бубнов, О.А. Шилова. Технологии приборостроения, № 3 (7), 60 (2003).
- [9] А.М. Гуляев, Ле Ван Ван, О.Б. Сарач, О.Б. Мухина. ФТП, **42** (6), 742 (2008).
- [10] С. Зайнабидинов, Д.Э. Назыров. Изв. вузов. Электроника, № 1, 87 (2007).
- [11] А.И. Максимов, В.А. Мошников, Ю.М. Таиров, О.А. Шилова. *Золь-гель технология. Основы золь-гель технологии нанокomпозитов* (СПб., Элмор, 2007).
- [12] И.В. Смирнова, О.А. Шилова, В.А. Мошников, М.Ф. Панов, В.В. Шевченко, Н.С. Клименко. Физика и химия стекла, **32** (4), 632 (2006).
- [13] И.В. Смирнова, О.А. Шилова, В.А. Жабрев, Ю.З. Бубнов. *Тр. XII Межд. науч.-техн. конф.* (М., ОАО ЦНИИ „Техномаш“ 2006) С. 64.
- [14] *Атомная диффузия в полупроводниках*, под ред. Д. Шоу (М., Мир, 1975).
- [15] А.Г. Козлов. Изв. ЛЭТИ, вып. 338, 79 (1984).
- [16] A. Leyderman, D. Arcos, Y.-C. Lee Charles. *Proc. Conf. on Photorefractive Fiber and Crystal Devices: Materials, Optical Properties and Applications VII*. Proc. SPIE, **4459**, 210 (2001).
- [17] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger, H. Baumgartel. J. Electrochem. Soc., **137** (11), 190 (1990).
- [18] А.И. Курносков, В.В. Юдин. *Технология производства полупроводниковых приборов*. Учеб. пособие (М., Высш. шк., 1974).
- [19] О.А. Шилова, Е.В. Тарасюк, В.В. Шевченко, Н.С. Клименко, Т.Г. Мовчан, С.В. Хашковский, В.В. Шилов. Физика и химия стекла, **29** (4), 527 (2003).
- [20] И.В. Смирнова, О.А. Шилова, Л.П. Ефименко, К.Э. Пугачев, В.А. Мошников, Ю.З. Бубнов. Физика и химия стекла, **33** (4), 429 (2007).
- [21] И.В. Смирнова, О.А. Шилова, В.А. Мошников. Изв. СПб-ГЭТУ „ЛЭТИ“, вып. 2, 3 (2004).
- [22] О.В. Александров, С.А. Высоцкая, И.В. Смирнова, О.А. Шилова. Матер. электрон. техники, № 1, 22 (2008).
- [23] И.В. Смирнова, О.А. Шилова, В.А. Жабрев, Ю.З. Бубнов. Физика и химия стекла, **35** (1), 127 (2009).
- [24] И.В. Смирнова. Автореф. канд. дис. (СПб., ИХС РАН, 2007).
- [25] А.Ф. Филиппов. *Введение в теорию дифференциальных уравнений* (СПб., КомКнига, 2007).
- [26] Б.П. Демидович. *Краткий курс высшей математики* (М., АСТ, 2005).
- [27] Н.Н. Олейников, Г.П. Муравьева. *Химия. Основные алгоритмы решения задач*, под ред. Ю.Д. Третьякова (М., УНЦДО, Физматлит, 2003).

Редактор Т.А. Полянская

## Futures of joint diffusion of boron and gadolinium in silicon from nanosized hybrid organic-inorganic films

I.V. Smirnova\*, O.A. Shilova\*\*+, V.A. Moshnikov+, A.E. Gamarts+

\* Grebenschikov Institute of Silicate Chemistry, Russian Academy of Sciences, 194034 St. Petersburg, Russia

+ Saint-Petersburg State Electrotechnical University „LETI“, 197376 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The sol-gel derived nanosized organic-inorganic films has been used as advanced diffusion sources of boron and gadolinium in silicon. Futures of boron diffusion profiles at their separate diffusion as wells as joint diffusion together with gadolinium. A special program and computational modeling has been carried out to adequate describe the complicated diffusion profiles of boron. To take account the redistribution of boron between glassy films and oxide the special model has been propose. Those allow finding optimal values of boron diffusion factors. As a results of the best accordance between experimental and calculation results has been achieved.