

ватой формы, которые, согласно габитусу кристалла, можно идентифицировать как муллит.

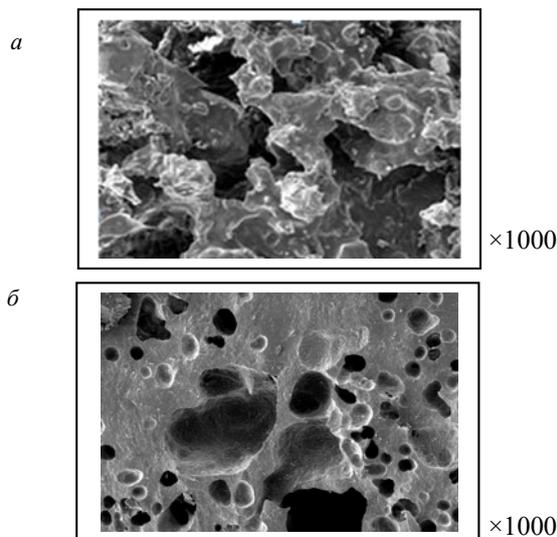


Рисунок 1 – ЭМ-изображение поверхности синтезированных материалов, полученных на основе составов первой серии (а) и второй серии (б)

Скопления кристаллов различной формы и размеров располагаются как на поверхности, так и во внутренних полостях пор и аналогичны для образцов всех исследуемых составов. На некоторых участках четко выделяются зерна шамота с прослойками аморфизированного вещества.

По результатам проведенных комплексных исследований разработаны теплоизоляционные

керамические материалы на основе огнеупорного и тугоплавкого глинистого сырья Беларуси. Сравнительная характеристика физико-химических свойств полученных материалов оптимальных составов представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические свойства разработанных теплоизоляционных материалов

Наименование свойства	Теплоизоляционные материалы, полученные на основе составов	
	первой серии	второй серии
Пористость общая, %	68	73
Плотность кажущаяся, кг/м <sup>3</sup>	860	722
Водопоглощение, %	69	76
Прочность при сжатии, МПа	2,79	2,54
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,25	0,18
Температура эксплуатации, не более, °С	1300	1200

Проведенные исследования показали целесообразность применения глинистоогнеупорного и тугоплавкого глинистого сырья Беларуси и утилизируемого пенообразователя «Барьер-пленкообразующий» для получения ячеистых теплоизоляционных керамических материалов, что позволит расширить сырьевую базу керамической отрасли, ассортимент выпускаемой продукции, решить проблемы импортозамещения, ресурсо- и энергосбережения, а также утилизации пенообразователей для пожаротушения с истекшим сроком годности.

УДК 621.382

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОДВИЖНОСТИ В КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРАХ

Жевняк О.Г.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Уменьшение размеров элементов современных интегральных микросхем, в частности, проводящих каналов МОП-транзисторов, приводит к тому, что перенос электронов в них приобретает сильно неоднородный и сильно нелокальный характер (см., например, [1; 2]). Электрические характеристики и связанные с ними электрофизические параметры – дрейфовую скорость и подвижность, – нельзя описать аналитическими или модельными приближениями. Зависимости величин этих параметров становятся существенно двумерными – они изменяются как вдоль проводящих каналов МОП-транзисторов, так и по их глубине.

Целью настоящего доклада явилось рассмотрение распределений подвижности электронов как вдоль проводящего канала в короткоканаль-

ном МОП-транзисторе, так и в глубь его (в подложку) и оценка влияния на эти распределения напряжения на стоке  $V_D$  и глубины залегания истока и стока  $d_j$ . Данные распределения были получены на основании численного моделирования движения электронов в проводящем канале транзистора методом Монте-Карло в соответствии с алгоритмами и процедурами, описанными в наших работах [3; 4].

Моделировался МОП-транзистор со следующими конструктивно-технологическими параметрами: длина канала  $L_{ch} = 0,2$  мкм, толщина подзатворного окисла  $d_{ox} = 6$  нм, концентрация донорной примеси в областях истока и стока  $N_D = 10^{26}$  м<sup>-3</sup>, концентрация акцепторной примеси в подложке  $N_A = 10^{24}$  м<sup>-3</sup>, напряжение на затворе  $V_G = 2$  В. Напряжение на стоке  $V_D$  изменялось от 1

до 3 В, глубина залегания истоковой и стоковой областей в подложку  $d_j$  равнялось 10, 50 и 100 нм (т. е. рассматривались три модельных МОП-транзистора с разной глубиной залегания данных областей и равными прочими параметрами).

На рис. 1–3 приведены полученные в результате моделирования распределения рассчитанных значений подвижности в разных продольных сечениях канала, расположенных на разной глубине в подложке, т. е. разным расстоянии от поверхности раздела оксид кремния/кремний: рис. 1 для трех в глубину подложки на расстоянии  $z_1 \approx 6$  нм (непрерывные линии),  $z_2 \approx 20$  нм (штриховые линии) и  $z_3 \approx 35$  нм (пунктирные линии), рис. 2 и 3 для двух в глубину подложки на расстоянии  $z_1 \approx 6$  нм (непрерывные линии) и  $z_2 \approx 20$  нм (штриховые линии).

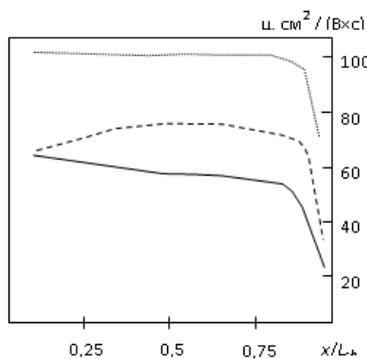


Рисунок 1 – Распределения вдоль канала МОП-транзистора величины подвижности электронов в разных его сечениях

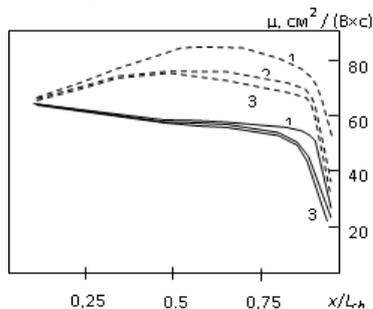


Рисунок 2 – Распределения вдоль канала МОП-транзистора величины подвижности электронов для разных значений напряжения на стоке: 1 –  $V_D = 1$  В; 2 –  $V_D = 2$  В; 3 –  $V_D = 3$  В;  $d_j = 50$  нм.

Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о существенной неоднородности распределений величины подвижности электронов вдоль проводящего канала в различных его сечениях в глубину подложки для рассмотренных условий. Средняя величина подвижности при удалении электронов от поверхности раздела оксид кремния/кремний заметно увеличивается. Для глубин  $z_1 \approx 6$  нм и  $z_3 \approx 35$  нм увеличение почти двукратное – от 50–55  $\text{см}^2 / (\text{В} \times \text{с})$  до 100  $\text{см}^2 / (\text{В} \times \text{с})$ . Данное различие можно объяс-

нить, с одной стороны, существенной неоднородностью величины напряженности электрического поля в проводящем канале короткоканального МОП-транзистора в различных его сечениях в глубину подложки, а, с другой стороны, относительно большой длиной свободного пробега электронов по сравнению с характерными длинами, на которых в МОП-транзисторе возникают высокие значения напряженности электрического поля. Вблизи границы раздела оксид кремния/кремний эти значения наблюдаются на заметно больших размерах, нежели в глубине подложки. Но электроны, разогреваясь у поверхности раздела, массово перемещаются в глубину подложки, где в целом напряженности электрического поля заметно меньше (только в очень узкой области вблизи стока они стремительно возрастают), что и способствует повышению значений подвижности электронов в глубине подложки – энергия электронов здесь довольно высока, а напряженность поля сравнительно не велика.

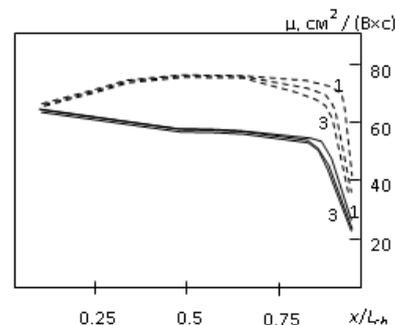


Рисунок 3 – Распределения вдоль канала МОП-транзистора величины подвижности электронов для разных значений глубины залегания стока: 1 –  $d_j = 10$  нм; 2 –  $d_j = 50$  нм; 3 –  $d_j = 100$  нм;  $V_D = 2$  В

Из поведения кривых на рис. 2 и 3 можно получить оценку влияния на неоднородность распределений подвижности электронов напряжения на стоке и глубины залегания истоковой и стоковой областей. Как видно из рис. 2 на начальной половине канала это влияние фактически отсутствует. Значит можно утверждать, что для рассмотренных условий поле стока на начальную половину канала не проникает. На второй половине канала увеличение напряжения на стоке заметно уменьшает величину подвижности электронов. При этом практически исчезает неоднородность по глубине в подложку – значения подвижности отличаются на незначительную величину и равняются 25–20  $\text{см}^2 / (\text{В} \times \text{с})$ .

Аналогичное влияние на неоднородность распределений подвижности оказывает и величина глубины залегания истоковой и стоковой областей. Для рассмотренных условий оно наблюдается только в узкой области проводящего канала вблизи стока (на расстоянии от стока не более четверти длины канала). С увеличением глубины залегания значения подвижности электронов

уменьшаются на указанном участке по сравнению с остальными участками более чем в два раза.

Таким образом, в настоящей работе с помощью численного моделирования методом Монте-Карло изучены двумерные распределения подвижности электронов в проводящем канале короткоканальных кремниевых МОП-транзисторов. Показана сильная неоднородность этих распределений по глубине канала в направлении подложки транзистора. Изучено влияние на эти распределения напряжения на стоке и глубины залегания истоковой и стоковой областей. Установлено, что это влияние существенно на участке канала вблизи стока, где наблюдаются очень высокие значения напряженности тянущего электрического поля.

УДК 621.793

### МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Zr-Ni

Захаров И.А.<sup>1</sup>, Касьяник А.В.<sup>1</sup>, Хомич Н.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>УП «Полимаг», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

#### Введение

Эффективная работа атомных реакторов и их безопасность непосредственно зависят от качества циркониевых компонентов тепловыделяющих сборок, в частности – оболочек твэлов.

Применяемая в настоящее время финишная механическая обработка (шлифование и полирование) труб-оболочек приводит к образованию в приповерхностном слое большого количества дефектов структуры (прижоги, микротрещины и др.), которые являются потенциальными очагами коррозионного и механического разрушения деталей.[1]

Высокое качество поверхности оболочек твэлов может быть обеспечено в процессе их изготовления применением финишной операции магнитно-абразивной обработки (МАО). В результате МАО формируются нанорельеф поверхности и приповерхностный слой с минимумом дефектов структуры. В результате значительно повышаются функциональные свойства твэлов, надежность и эксплуатационная безопасность атомных реакторов.[2, 3]

#### Метод магнитно-абразивной обработки

Суть процесса МАО состоит в том, что ферроабразивный порошок под действием магнитного поля приобретает вид «эластичной щетки» и полирует поверхность изделия. При этом импульсное магнитное поле оказывает определяющее воздействие на особенности формируемой поверхности с шероховатостью наноуровня и дефекты структуры приповерхностного слоя. Это влияние обусловлено физико-химическими явлениями и процессами массо- и теплопереноса на

#### Литература

1. Scaling the MOS Transistor Below 0.1  $\mu\text{m}$ : Methodology, Device Structures, and Technology Requirements / C. Fiegna C. et al. // IEEE Trans. Electron Dev. – 1994. – Vol. 41, No 6. – P. 941–951.

2. Красников, Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. – Москва : Техносфера, 2011. – 799 с.

3. Борздов, В.М., Жевняк, О.Г., Комаров, Ф.Ф., Галенчик В.О. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники – Минск : БГУ, 2007. – 175 с.

4. Zhevnyak, O. Temperature effect on electron transport in conventional short channel MOSFETs: Monte Carlo simulation // Proc. SPIE. – 2008. – Vol. 7025. – P. 1M-1–8.

атомно-молекулярном уровне, протекающими в присутствии магнитного поля при взаимодействии обрабатываемого материала и компонентов ферроабразивного порошка и применяемых технологических жидкостей.

Операция МАО труб-оболочек твэлов из сплава Zr-Ni производилась ферроабразивным порошком, на основе железа и карбида титана с применением специальных технологических жидкостей.

«Мягкие» режимы МАО, влияние магнитного поля и оптимальные составы порошков и жидкостей позволяют обеспечить комплекс свойств труб-оболочек, отвечающих высоким требованиям эксплуатации атомных реакторов.

#### Результаты магнитно-абразивной обработки

Одним из основных контролируемых параметров при изготовлении твэлов является показатель шероховатости Ra наружной и внутренней поверхностей изделия.

Измерения шероховатости выполнялись с использованием профилометра «MarSurf PS1» (Maht, Германия). Измерения наружного диаметра (Dн) выполнялись с помощью цифрового микрометра МКЦ25 (ООО НПП «ЧИЗ», Россия) с шагом дискретности 0,001 мм и пределом допускаемой погрешности  $\pm 2$  мкм.

Значения размеров Dн образцов представлены в таблице 1.

Значения параметра Ra шероховатости наружной поверхности образцов представлены в таблице 2.

Фотографии микрорельефа поверхности образцов выполнены на микроскопе инвертирован-