

PACS numbers: 68.37.Ps, 68.55.J-, 78.30.-j, 81.15.Gh, 81.20.Fw, 81.65.Ps, 82.70.Gg

Синтез и исследование силикатных золь–гель-покрытий для микро- и нанoeлектроники

В. В. Васькевич, В. Е. Гайшун, Д. Л. Коваленко

*Учреждение образования
«Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»,
ул. Советская, 104,
246019 Гомель, Республика Беларусь*

В работе рассмотрена возможность создания диэлектрических SiO₂-покрытий на основе золь–гель-метода путём гидролиза металлоорганических соединений кремния в водно-спиртовой смеси. Описаны оптимальные параметры нанесения и термообработки для получения однородных покрытий на поверхности монокристаллического кремния. Выполнены исследования механической стойкости к истиранию как основного вида испытания покрытий на прочность и адгезию к поверхности подложки. Методом ИК-спектроскопии изучены фазовые и структурные превращения в процессе формирования золь–гель-плёнок. Методом АСМ установлены зависимости состояния и морфологии поверхности покрытий от состава исходного плёнообразующего раствора и технологических режимов получения диэлектрических плёнок. Проанализированы электрофизические свойства сформированных МДП-структур в зависимости от состава плёнообразующего раствора.

У роботі розглянуто можливість створення діелектричних SiO₂-покривів на основі золь–гель-методу шляхом гідролізу металоорганічних сполук кремнію у водно-спиртовій суміші. Описано оптимальні параметри нанесення та термооброблення для одержання однорідних покривів на поверхні монокристалічного кремнію. Виконано дослідження механічної стійкості до стирання як основного виду випробування покривів на міцність і адгезію до поверхні підложки. Методом ІЧ-спектроскопії вивчено фазові й структурні перетворення в процесі формування золь–гель-плівок. Методом АСМ встановлено залежності стану й морфології поверхні покривів від складу вихідного плівкоутворювального розчину та технологічних режимів одержання діелектричних плівок. Проаналізовано електрофізичні властивості сформованих МДП-структур залежно від складу плівкоутворювального розчину.

The possibility of protective SiO₂ coatings based on sol–gel method with hy-

drolysis of organometallic compounds of silicon in a water–alcohol mixture is considered. The optimal parameters of application and heat treatment to obtain homogeneous coatings on single-crystalline silicon are described. The studies of mechanical abrasion resistance as the main type of coatings' testing on strength and adhesion to the substrate surface are performed. Phase and structural transformations during the sol–gel films' fabrication are studied by IR spectroscopy. Dependences of the coating-surface state and morphology on the original film-forming solution composition and technological modes of dielectric-films' fabrication are established by AFM method. Electrophysical properties of formed MDS structures depending on the film-forming-solution composition are analysed.

Ключевые слова: золь–гель-технология, стойкость к истиранию, структура поверхности, диэлектрическая проницаемость.

(Получено 21 ноября 2013 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Уменьшение размеров конденсаторных и транзисторных элементов ИС требует внедрения в микроэлектронную индустрию новых тонкоплёночных материалов, как с высокой, так и с низкой диэлектрической проницаемостью. В то же время для снижения временной задержки в ИС с многоуровневыми системами металлизации остро необходимы изолирующие материалы с низкой диэлектрической проницаемостью. В качестве изолирующих диэлектрических слоёв с низкой диэлектрической проницаемостью могут использоваться различные классы органических и неорганических соединений, а также гибридные неорганически-органические соединения, обеспечивающие величину диэлектрической проницаемости $k = 2,2-3,5$ [1]. Дальнейшее снижение величины k обеспечивается созданием пористых структур с размером пор в единицы нанометров и объёмной пористостью 20–50%. Для создания таких диэлектрических структур в основном используются методы: PVD (Physical Vapour Deposition) — физическое осаждение из газовой (паровой) фазы, CVD (Chemical Vapour Deposition) — химическое осаждение из газовой (паровой) фазы.

Одним из прогрессивных методов получения силикатных систем является золь–гель-метод, позволяющий синтезировать различные виды материалов при невысоких температурах. Этот метод обладает такими преимуществами, как простота используемого оборудования, экономичность, экологичность, гибкость технологии. С помощью золь–гель-метода могут быть синтезированы разнообразные классы материалов различного состава: аэрогели, многокомпонентные гели, кварцевые стекла, плёнки и др. Преимущество создаваемого состава плёнообразующего раствора для формирова-

ния защитного покрытия состоит в следующем: формируемые покрытия имеют низкую диэлектрическую проницаемость; сокращение трудоёмкости технологических процессов и значительное снижение энергетических затрат по сравнению с вакуумными и термическими методами получения покрытий при производстве интегральных микросхем; использование разработки позволит уменьшить зависимость от поставок импортных материалов и снизить затраты на производство интегральных микросхем более чем в 25 раз.

Таким образом, разработка методов формирования новых тонкоплёночных диэлектрических материалов для микро- и нанoeлектроники на основе диоксида кремния, с низкой диэлектрической проницаемостью, с использованием энергосберегающей золь-гель-технологии синтеза, и путей их интеграции является актуальной задачей технологии современной микроэлектроники и нанoeлектроники.

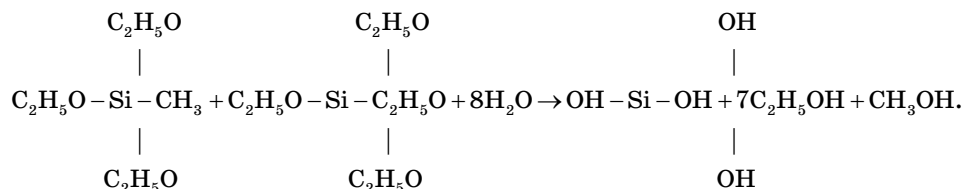
2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Наличие функциональных групп в плёнке обеспечивает надёжное сцепление её с подложкой (в частности, с поверхностью стекла) за счёт возникновения химических связей. Весьма ценные свойства плёнкообразующих веществ присущи также полиэлементоорганосилоксанам — соединениям, представляющим собой полимеры с главными цепями из неорганических молекул, обрамлённых органическими группами. Эти полимеры высоко термостабильны, водостойки, устойчивы к действию света. С точки зрения получения тонких прозрачных защитных плёнок наиболее интересны сополимеры гетероорганосилоксанов с различными органическими и органосилоксановыми группами.

Указанные выше плёнкообразующие алкоксисоединения и неорганические вещества используют в виде растворов в полярных органических жидкостях, спирто-водных или ацетоно-водных смесях. При этом содержание воды, в зависимости от природы плёнкообразующего вещества, колеблется от 0,1% до 10–20%. В некоторых случаях при получении плёнок из смесей нескольких соединений возможно применение и смешанных полярных и неполярных растворителей [2].

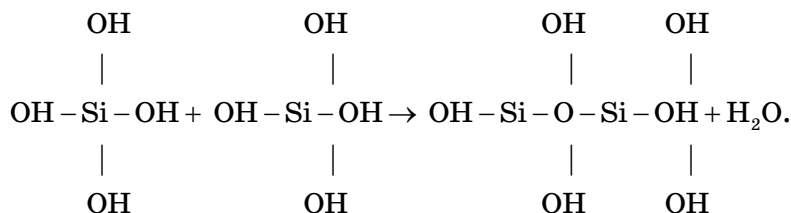
Получение коллоидного раствора кремниевой кислоты основано на реакции гидролиза эфиров ортокремниевой кислоты. Добавление к кремниевым эфирам небольшого количества воды приводит к образованию поликремневых эфиров. В работе рассматривается синтез плёнкообразующих растворов из тетраэтилортосиликата (ТЭОС, $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$), метилтриэтоксисилана (МТЭС, $\text{CH}_3\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3$), винилтриэтоксисилана (ВТЭС, $\text{C}_8\text{H}_{28}\text{O}_3\text{Si}$) и фенилтриэтоксисилана

(ФТЭС, $C_{12}H_{20}O_3Si$). В исходном состоянии, а также в органических растворителях, указанные соединения полимерных цепочек не образуют. Для золь-гель-превращений необходимы молекулы воды или неорганические соединения с OH -группами, которые инициируют реакции гидролиза и поликонденсации. При смешивании всех исходных компонентов происходило нагревание раствора до температуры $\cong 40^\circ C$. Таким образом, при гидролизе происходит замещение алкильной группы OH -группой:



Образовавшиеся молекулы гидроксила кремния ($Si(OH)_4$) взаимодействуют между собой, образуя цепочки, а из них затем трёхмерную сетчатую структуру, посредством $\equiv Si-O-Si \equiv$ -связей. Гидролиз ведут в присутствии спирта. Следует, однако, учитывать то обстоятельство, что при длительном хранении таких растворов происходит полимеризация кремниевой кислоты.

Во время созревания золя происходит поликонденсация:



Эти превращения происходят при относительно низких температурах около $20-25^\circ C$. Структура образующегося коллоидного раствора определяется типом и концентрацией катализатора, органическим растворителем и температурой выполнения золь-гель-перехода. Для созревания раствора его выдерживали при температуре окружающей среды $22 \pm 2^\circ C$ в течение 2-3 суток. Время созревания раствора может быть сокращено введением в раствор катализаторов — незначительных добавок кислот. Наличие кислоты в растворе определяет не только скорость процесса созревания, но и качество получаемых плёнок.

Нанесение золя на подложку осуществлялось методом центробежного ускорения. Этот метод является самым распространённым на предприятиях электронной промышленности, где для нанесения плёнок используют установку с автоматическим захватом пластины, нанесением раствора методом центрифугирования и последу-

ющей термообработкой в печи.

После нанесения золя на поверхность подложек, образцы были помещены в печь, где были нагреты до температуры от 100 до 400°C, затем извлекались и остывали на воздухе. Высокотемпературная обработка, после которой происходит полное уплотнение плёнок, оказывает существенное влияние на структуру поверхности золь-гель-плёнок и их гидрофобные свойства.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТОДОМ ИСТИРАНИЯ

Для определения механической прочности тонких защитных плёнок чаще всего применяют склерометрический метод и метод истирания. Наиболее подходящим методом определения механической прочности защитных плёнок является метод, основанный на определении стойкости плёнок к истиранию. Это ближе к реальным условиям как изготовления разнообразных изделий с тонкими покрытиями, так и их эксплуатации.

В данной работе механическая прочность полученных защитных покрытий может быть охарактеризована сопротивляемостью к истиранию (схема установки показана рис. 1).

Прочность покрытий определялась методом истирания резиновым наконечником, изготовленным из пищевой резины средней плотности, через батистовую прокладку при следующих параметрах:

- частота вращения, мин^{-1} — 100,
- нагрузка на наконечник, г — 200,
- расстояние от оси вращения, мм — 5.

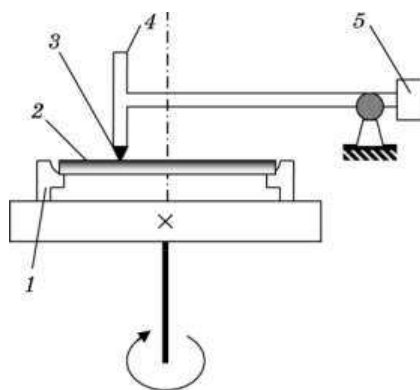


Рис. 1. Схема установка для контроля механической прочности покрытий: 1 — патрон; 2 — оптическая деталь с золь-гель-покрытием; 3 — наконечник; 4 — место для установки груза; 5 — противовес.

ТАБЛИЦА 1. Механическая стойкость плёнок к истиранию в зависимости от состава плёнкообразующего раствора и температуры обработки плёнок.

Тип металлоорганического соединения	Температура обработки, °С	Механическая стойкость, циклы стирания
МТЭС + ТЭОС	200	2640
МТЭС + ТЭОС	300	3758
МТЭС + ТЭОС	400	5000
ФТЭС	200	1980
ФТЭС	300	2370
ФТЭС	400	3981
ВТЭС	200	2250
ВТЭС	300	3612
ВТЭС	400	5000
ТЭОС	200	3130
ТЭОС	300	4610
ТЭОС	400	5000

В таблице 1 приводятся данные по механической стойкости покрытий к истиранию по описанной выше методике. Механическая стойкость определялась количеством циклов истирания до момента полного удаления плёнки с поверхности подложки, либо до 5000 циклов истирания, что свидетельствует о высокой прочности полученного покрытия.

По полученным результатам можно сделать вывод, что на прочность и адгезионные свойства покрытий существенное влияние оказывает температура термообработки. При температуре обработки до 200°С из покрытия происходит полное удаление адсорбированной воды, однако данной температуры недостаточно для полного удаления органических остатков и растворителя вследствие чего покрытие менее стойкое. При температуре обработки 300°С происходит окончательный гидролиз и разложение промежуточных продуктов гидролиза и органических остатков. При обработке выше 400°С происходит полная дегидратация и окончательное формирование оксида. Все покрытия, прошедшие такую термообработку, прошли испытание и показали прочность выше 5000 циклов истирания.

3. ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛЬ–ГЕЛЬ-ПЛЁНОК

С целью определения степени влияния температуры отжига на структурное состояние золь–гель-покрытий была сформирована

серия образцов. Покрытия наносились на зеркально полированные кварцевые и кремниевые пластины методом центрифугирования, затем подвергались отжигу при различной температуре: 20, 50, 100, 200, 300, 500, 700, 1000 и 1100°C. На всех стадиях термообработки плёнки оставались однородными и прозрачными без визуально наблюдаемых дефектов.

Для выяснения структурных особенностей плёнок на различных этапах температурной обработки были выполнены измерения ИК-спектров пропускания в диапазоне 5–25 мкм на двухканальном спектрофотометре типа SPECORD 75 IR.

В качестве подложек для снятия ИК-спектров плёнок использовали стандартные зеркально полированные кремниевые пластины марки КЭФ-4.5 толщиной 450 мкм. Пропускание этих пластин кремния в инфракрасной области спектра составляет около 50%. Для получения спектров пропускания золь-гель-плёнок и исключения из спектра полос поглощения кремниевой подложки в канале сравнения была установлена чистая пластина кремния.

На рисунке 2 представлены ИК-спектры поглощения SiO_2 золь-гель-покрытий.

В таблице 2 представлены волновые числа пиков поглощения плёнок в ИК-области спектра (наблюдаемых на соответствующих спектрах) и отнесённые к ним типы колебаний и связей.

Сразу после нанесения плёнок в ИК-спектрах наблюдается несколько чётко выраженных полос поглощения: широкая полоса, расположенная в пределах 2800–3600 см^{-1} , связанная с наличием СН- и ОН-групп в составе плёнки и адсорбированных на поверхности молекул этанола и воды; 1100 см^{-1} , соответствующая связи Si–O–Si; 1065 см^{-1} , вызванная валентными колебаниями Si–O–Si; 950 см^{-1} , обусловленная деформационными колебаниями Si–OH. Увеличение температуры отжига приводит к постепенному снижению интенсивности широкой полосы поглощения расположенной на 2800–3600 см^{-1} и пиков на 1100 см^{-1} и 950 см^{-1} , которые полностью исчезают после термообработке выше 400°C.

Вместе с тем, интенсивность и положение основного пика зависит от температуры отжига. На рисунке 3 приведена зависимость положения максимума пика полосы поглощения связи Si–O–Si.

Изменения в ИК-спектрах, вызванные термообработкой, свидетельствуют о существенной зависимости структуры плёнок от температуры отжига. Анализ ИК-спектров пропускания позволяет утверждать, что при увеличении температуры обработки до 400°C, из плёнки удаляются органика и вода за счёт испарения жидкого компонента растворителя из пор. Об этом свидетельствует постепенное уменьшение с ростом температуры интенсивности, а затем и полное исчезновение пиков поглощения СН- и ОН-групп на соответствующих участках спектра.

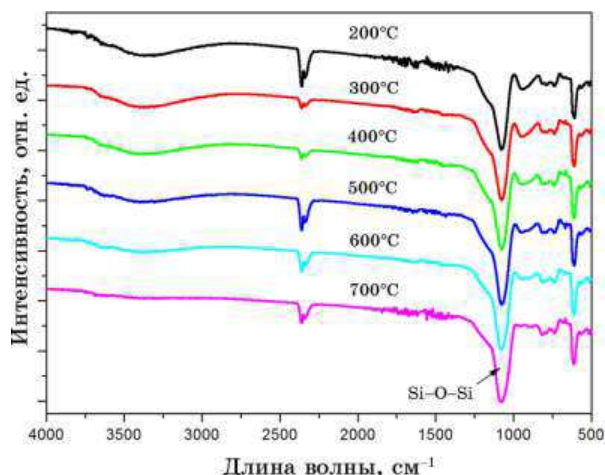


Рис. 2. ИК-спектр поглощения SiO_2 золь-гель-покрытий.

ТАБЛИЦА 2. Волновые числа пиков поглощения.

Волновое число, см^{-1}	Тип колебаний	Связь
3800–3000	валентное	O–H
1800	деформационное	H–O–H
1700	деформационное	H–O–H
1610	деформационное	H–O–H
1550	деформационное	H–O–H
1050	валентное	Si–O–Si
1085	валентное	Si–O–Si
950	деформационное	O–Si–O, Si–OH
800	валентное	SiO_4
785	валентное	Si–O–Si
450–400	деформационное, вращательное	Si–O–Si

В диапазоне температур 400–700°C отсутствуют какие-либо значительные изменения в спектрах, что может быть следствием полного удаления воды и органики из плёнки, связанное с завершением протекания реакций поликонденсации. Увеличение относительной интенсивности основной полосы поглощения, относящейся к валентным колебаниям Si–O–Si, и её сдвиг в область больших волновых чисел после обработки выше 700°C обусловлены формированием кремний-кислородного каркаса и полным его уплотнением с образованием стехиометрического диоксида кремния при 1000°C. Также с увеличением температуры, в области 800 см^{-1} растёт интенсивность полосы поглощения, которая относится к колебаниям

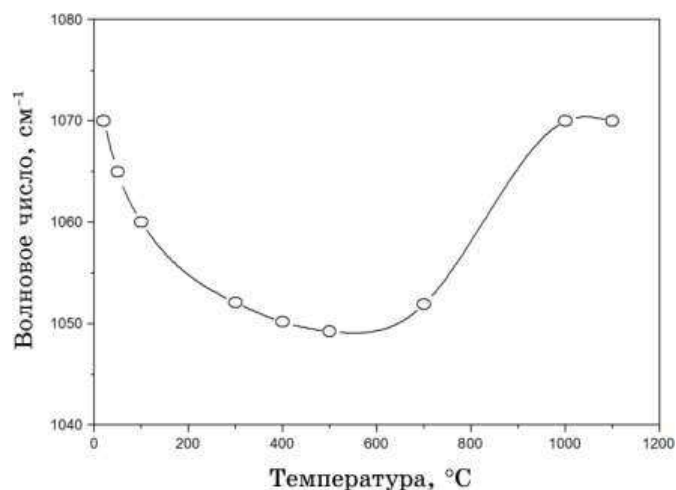


Рис. 3. Зависимость положения максимума основного пика поглощения связи Si–O–Si от температуры отжига.

кремний-кислородных групп, где кремний находится в четырёхкоординационном состоянии. Описанное выше поведение линий поглощения в ИК-области свидетельствует о наличии аморфной кварцевоподобной структуры, образованной кремний-кислородными связями при высоких (выше 700°C) температурах. Тогда как при меньших температурах (ниже 400°C) формируется просто пористая деполимеризованная сетка.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ АСМ-СПЕКТРОСКОПИИ.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) является эффективным инструментом контроля состояния и морфологии поверхности покрытий, которые зависят от технологических режимов получения материала. Свойства материала определяются микроструктурой слоя: толщиной, пористостью, степенью шероховатости и т.п. [5]. При исследовании жёстких образцов изображения, полученные в контактном и бесконтактном режимах, могут выглядеть одинаково. Однако если на поверхности жёсткого образца лежат, например, несколько монослоёв конденсированной влаги, то эти изображения могут значительно различаться. АСМ, работающий в контакте, будет проникать через слой жидкости, отображая нижележащую поверхность, тогда как бесконтактный АСМ будет давать изображение поверхности слоя влаги.

На рисунке 4 представлены АСМ-изображения поверхности золь-гель плёнок приготовленных из золя на основе соединений тетра-

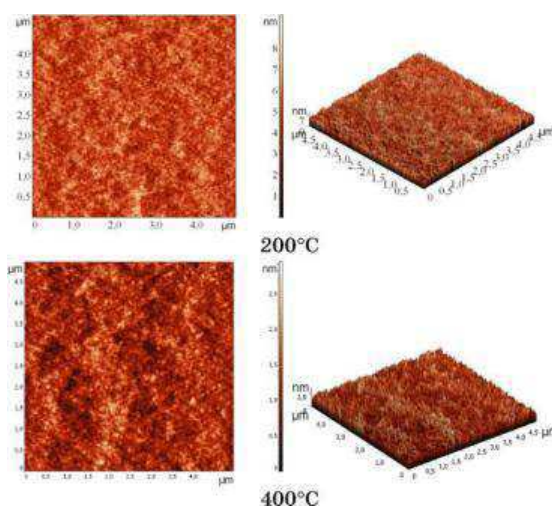


Рис. 4. АСМ-изображение поверхности плёнки, приготовленной на основе соединений ТЭОС и МТЭС.

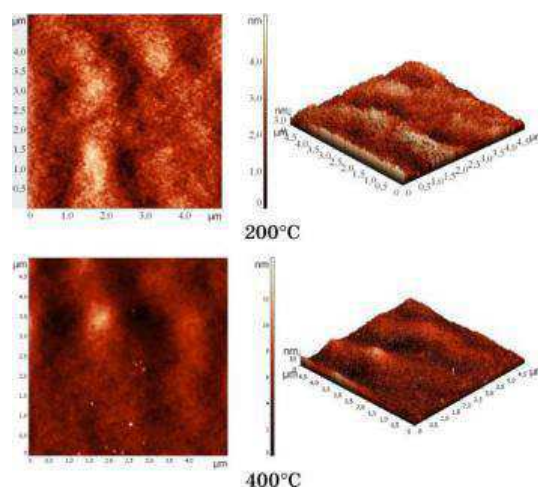


Рис. 5. АСМ-изображение поверхности плёнки, приготовленной на основе соединений VTЭС.

этиортосиликата (ТЭОС) и метилтриэтоксисилана (МТЭС), обработанных при температуре 200 и 400°C. Покрытия являются сплошными на ровной поверхности без видимых включений. Анализ показывает, что покрытия являются однородными по всей сканируемой поверхности плёнки, перепад высоты составляет 6–8 нм для плёнок с обработкой при 200°C и 2–3 нм для температуры обработки 400°C.

Более гладкую поверхность образца, сформированного при 400°C, можно объяснить полностью сформировавшейся структурой диоксида кремния и полным испарением органических составляющих.

На рисунке 5 представлены АСМ-изображения золь-гель-плёнок, приготовленных из золя на основе венилтриэтоксисилана (ВТЭС) и обработанных при температуре 200 и 400°C. Покрытия являются сплошными на ровной поверхности без видимых включений. Анализ показывает, что покрытия являются однородными по всей сканируемой поверхности плёнки, перепад высоты составляет 3–6 нм для плёнок с обработкой при 200°C и 15–40 нм для температуры обработки 400°C.

Более гладкая поверхность образца сформированного при 200°C по сравнению с образцами, сформированными при 400°C, объясняется более низкой температурой формирования плёнок из ВТЭС по сравнению с ТЭС и МТЭС, увеличение температуры обработки до 400°C приводит к вспениванию покрытия.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Структуры металл-диэлектрик-полупроводник, или сокращённо МДП-структуры, широким интересом к изучению их физических свойств обязаны появлению планарной технологии и развитию нового класса полупроводниковых приборов, работающих на основе эффекта поля, таких как приборы с зарядовой связью, полевые транзисторы с изолированным затвором. МДП-структуры позволяют анализировать основные процессы, протекающие в таких приборах, и являются чрезвычайно удобными объектами исследования. МДП-структура представляет собой монокристаллическую пластину полупроводника, называемую подложкой, закрытую с планарной стороны диэлектриком. Металлический электрод, нанесённый на диэлектрик, носит название затвора, а сам диэлектрик называется подзатворным. На обратную непланарную сторону полупроводниковой пластины наносится металлический электрод, называемый омическим контактом. Для измерения диэлектрических свойств на поверхности плёнок, вакуумными методами, были сформированы алюминиевые площадки площадью 1 мм². Полученная в работе МДП-структура, приведённая на рис. 6, состоит из затвора, подзатворного диэлектрика и полупроводниковой подложки.

Скорость образования плёнки и её сцепление с поверхностью стекла определяется правильным подбором соотношения компонентов раствора, химическими свойствами образующихся плёнок, относительной влажностью воздуха и температурой поверхности стекла. Как правило, сцепление с поверхностью стекла протекает тем быстрее, чем легче осаждается из раствора соответствующая

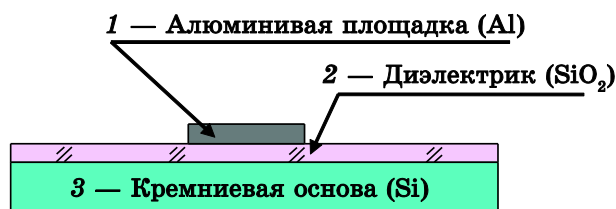


Рис. 6. Устройство МДП (МОП) структуры: 1 — затвор; 2 — подзатворный диэлектрик (окисел); 3 — полупроводниковая подложка.

гидроокись и чем меньше её растворимость в выбранном растворителе (спирте, воде и др.).

Из растворов гидролизующихся соединений можно получить плёнки различной толщины от 50–100 нм до 2,0–5,0 мкм. В некоторых случаях при нанесении окисных плёнок на изделия из высокотемпературостабильных материалов, например на поверхность кремния, необходимая толщина плёнки может достигать 20,0–30,0 мкм. Нанесение таких толстых плёнок возможно лишь путём многократного наслаивания с промежуточным прогревом — упрочнением при 400–700°C после нанесения каждого слоя.

На рисунке 7 представлены изображения РЭМ-скола полученных образцов. Можно увидеть, что диэлектрические плёнки имеют однородную структуру, термический окисел имеет толщину от 10 до 20 нм.

Результаты измерения диэлектрических свойств, показателя преломления и толщины полученных покрытий представлены в табл. 3.

Из таблицы видно, величина показателя преломления на образцах на основе ВТЭС составляет 1,401–1,420, что близко к величине показателя для термического окисла равной 1,420. Для образцов на основе ТЭС + МТЭС, величина показателя преломления составляет 1,439–1,462, что несколько превышает величину показателя для термического окисла. Наличие подслоя термического окисла не оказывает влияния на толщину полученных покрытий, которая варьируется от 0,93 до 1,04 мкм. Это связано с тем, что толщина термического окисла на несколько порядков меньше толщины полученных диэлектрических SiO₂ покрытий. Величина диэлектрической проницаемости слоёв находится в диапазоне 4,42–8,20, что превышает её значение для термической двуокиси кремния равное 3,8.

Одним из важнейших электрофизическим свойством МДП-структур является ток утечки, который протекает между двумя или несколькими электродами через диэлектрик между этими электродами под действием постоянного напряжения. При малых напряжениях ток утечки затвора быстро падает до пикоамперного диапа-

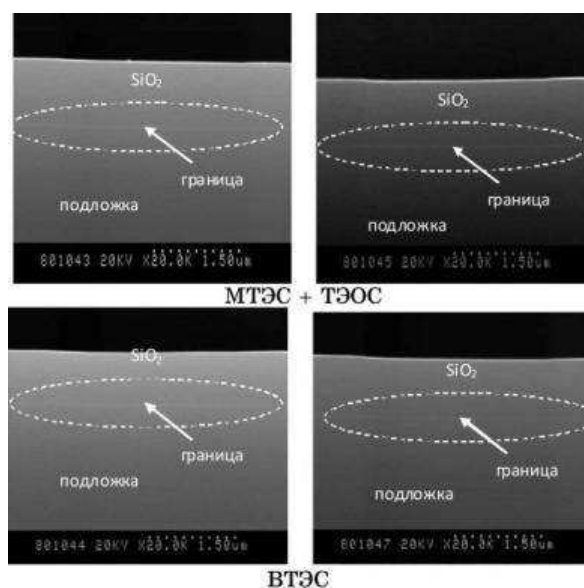


Рис. 7. Изображение РЭМ-скола золь-гель SiO₂ диэлектрических плёнок на поверхности монокристаллического кремния.

ТАБЛИЦА 3. Электрофизические параметры диэлектрических слоёв.

№ образца	Показатель преломления	Толщина слоя по РЭМ-сколу, мкм	Диэлектрическая проницаемость
ВТЭС	1,420	0,94	8,20
	1,401	1,01	7,44
МТЭС + ТЭОС	1,462	0,93	4,42
	1,439	1,04	4,81

зона, когда напряжение существенно меньше напряжения пробоя. У МОП-транзисторов никогда нельзя допускать пробоя изоляции затвора. В интегральных схемах на полевых транзисторах с толщиной диэлектрического слоя 20–100 нм величина тока утечки лежит в пикоамперном диапазоне при напряжении до 5 В, результаты по величине тока утечки через полученные МПД-структуры представлены в табл. 4. Из данных таблицы видно, что на всех образцах она небольшая составляет от десятков до сотен пикоампер, что является хорошим результатом для диэлектрика толщиной порядка 1 мкм.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диэлектрические SiO₂-покрытия, синтезированные золь-гель-методом, характеризуются высокой стойкостью, которая достига-

ТАБЛИЦА 4. Обобщённые данные по величине тока утечки через полученные МДП-структуры при напряжении +5 В.

Состав образца	Усреднённая величина тока утечки конденсаторов при напряжении +5 В, нА
ВТЭС	0,28
	0,16
МТЭС + ТЭС	0,052
	0,063

ется при температуре обработки выше 400°C. Анализ ИК-спектров показывает, что при температуре обработки 400°C образуется аморфная кварцеподобная структура; при увеличении температуры обработки выше 700°C образуется структура на основе кремний-кислородных связей.

На основе АСМ определена зависимость структуры поверхности формируемых золь-гель-плёнок на основе различных органических соединений кремния от температуры отжига. При температурах обработки 200°C шероховатость поверхности составляет 5–10 нм, при увеличении температуры отжига до 400°C происходит уменьшение шероховатости до 2–4 нм.

Величина показателя преломления на образцах на основе ВТЭС составляет 1,401–1,420, что близко к величине показателя для термического окисла равной 1,420. Для образцов на основе ТЭС + МТЭС, величина показателя преломления составляет 1,439–1,462, что несколько превышает величину показателя для термического окисла. Наличие подслоя термического окисла не оказывает влияния на толщину полученных покрытий, которая варьируется от 0,93 до 1,04 мкм. Это связано с тем, что толщина термического окисла на несколько порядков меньше толщины полученных диэлектрических SiO₂-покрытий. Величина диэлектрической проницаемости слоёв находится в диапазоне 4,42–8,20, что превышает её значение для термической двуокиси кремния равное 3,8.

На поверхности данных покрытий PVD- и CVD-методами могут быть сформированы тонкие слои металлов и полупроводников, без изменения электрофизических и физико-химических свойств диэлектрического SiO₂-подслоя.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Васильев, К. А. Воротилов, А. С. Сигов, *Электронная промышленность*, № 3: 145 (2004).
2. Е. Н. Подденежный, А. А. Бойко, *Золь-гель синтез оптического кварцевого стекла* (Гомель: Учреждение образования «ГГТУ им. П. О. Сухого»: 2002).

3. А. Адамсон, *Физическая химия поверхностей* (Москва: Мир: 1979).
4. С. Моррисон, *Химическая физика поверхности твердого тела* (Москва: Мир: 1980).
5. В. Л. Миронов, *Основы сканирующей зондовой микроскопии* (Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН: 2004).

REFERENCES

1. V. A. Vasiliev, K. A. Vorotilov, and A. S. Sigov, *Ehlektronnaya Promyshlennost'*, No. 3: 145 (2004) (in Russian).
2. E. N. Poddenezhnyy and A. A. Boyko, *Sol–Gel Synthesis of Optical Quartz Glass* (Gomel': Uchrezhdenie Obrazovaniya 'P. O. Sukhoy GGTU': 2002) (in Russian).
3. A. W. Adamson, *Physical Chemistry of Surfaces* (Moscow: Mir: 1979) (Russian translation).
4. S. R. Morrison, *The Chemical Physics of Surfaces* (Moscow: Mir: 1980) (Russian translation).
5. V. L. Mironov, *Fundamentals of Scanning Probe Microscopy* (Nizhny Novgorod: Institute for Physics of Microstructures, RAS: 2004) (in Russian).