

## **Низкотемпературное осаждение из газовой фазы при субатмосферном давлении слоёв диоксида кремния окислением тетраэтоксисилана смесью озон-кислород для применения в субмикронных интегральных микросхемах.**

### **Часть 2. Исследование роста слоёв в условиях непрерывного напуска реагентов**

*Васильев В.Ю.*

*Рассмотрены результаты исследований и разработки процессов низкотемпературного осаждения из газовой фазы при субатмосферном давлении слоёв диоксида кремния окислением тетраэтоксисилана смесью озон-кислород для применения в субмикронных интегральных микросхемах. В первой части работы выполнен литературный обзор состояния исследований, технологических проблем, направлений и задач исследования. Во второй части работы изложены результаты экспериментальных исследований закономерностей роста слоёв диоксида кремния в условиях непрерывной подачи парогазовой смеси в реактор на промышленной установке Precision-5000 и подложках диаметром 200 мм с разными нанесёнными на поверхность диэлектрическими слоями. Охарактеризованы процессы роста слоёв, эффект «поверхностной чувствительности» к материалам подложки, а также рост слоёв на ступенчатых поверхностях интегральных микросхем.*

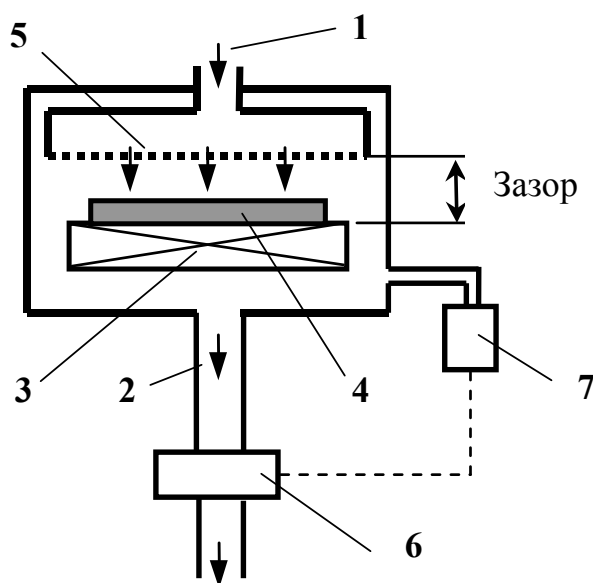
#### **Введение**

В первой части работы [1] выполнены литературный обзор, систематизация и анализ опубликованных данных по процессу химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) слоёв диоксида кремния окислением тетраэтоксисилана (ТЭОС) смесью озон-кислород в условиях атмосферного и субатмосферного давления реагентов. В частности, отмечалось, что при повышении концентрации озона в исходной парогазовой смеси обнаруживаются эффекты «поверхностной чувствительности» (зависимости скорости осаждения и свойств диоксида кремния от материала подложки) и формирования «сглаженного» профиля покрытия диоксидом кремния ступенек рельефа интегральных микросхем (ИМС). Данный процесс ХОГФ является фактически единственным универсальным термически активированным процессом осаждения в субмикронной технологии ИМС, который может быть использован во всех узлах ИМС. Например, в отличие от процесса осаждения в плазме высокой плотности, сочетающего одновременно процессы осаждения слоя и его распыление, осаждение с использованием термически активированной реакции окисления ТЭОС смесью озон-кислород не оказывает каких-либо негативных плазменных воздействий на ИМС. При этом благодаря уникальному эффекту «сглаженного» роста слоёв на рельефе особый интерес представляет применение данного процесса осаждения для высокоразвитых (часто называемых «агрессивными») ступенчатых рельефов ИМС. В итоге автор пришёл к выводу о необходимости проведения более глубоких исследований особенностей процесса роста слоёв в системе ТЭОС- $O_3/O_2$  для его дальнейшего развития, вероятнее всего, при реализации в режиме поверхностного атомно-слоевого осаждения (АСО). Режим АСО характеризуется практически 100 % конформностью осаждения слоёв и, по основной идее метода, для реализации требует применения последовательно-импульсного напуска реагентов при ХОГФ. Однако перед исследованиями режимов АСО необходимо предварительное проведение более глубоких кинетических исследований особенностей процесса роста слоёв в системе ТЭОС- $O_3/O_2$  в обычных условиях непрерывной подачи реагентов в реактор.

Во второй части работы изложены результаты экспериментальных исследований основных закономерностей роста слоёв диоксида кремния в условиях субатмосферного давления реагентов при непрерывной подаче реагентов, полученных с использованием прецизионного промышленного оборудования для ХОГФ. Фокус исследований в основном был направлен на получение данных, по тем или иным причинам не освещённых в литературе. Частично результаты данной работы представлялись ранее на научно-технических конференциях [2-4], однако обобщение накопленного совокупного материала для слоёв диоксида кремния выполняется впервые. Что касается результатов получения в системе ТЭОС- $O_3/O_2$  слоёв стёкол (фосфоросиликатного и борофосфоросиликатного), то такие результаты подробно излагались в работах автора [5,6] и в данной работе не рассматриваются.

### Эксперимент

Основная серия экспериментов по осаждению слоёв диоксида кремния окислением ТЭОС смесью  $O_3/O_2$  в условиях субатмосферного давления и непрерывного напуска исходных реагентов проводилась с использованием промышленной автоматизированной кластерной установки Precision-5000 производителя Applied Materials (США) [7]. Установка оснащена индивидуальными камерами для осаждения слоёв в разных режимах по рабочему давлению, в том числе в режиме субатмосферного давления («subatmospheric pressure»), известном также как «SACVD» режим. Упрощённая



**Рис. 1**

Упрощённая схема одной реакционной камеры установки для осаждения тонких слоёв:

- 1 – ввод газа; 2 – выброс газовой смеси;
- 3 – нагреватель; 4 – подложка;
- 5 – душевая (перфорированная) газораспределительная система;
- 6 – дроссельная заслонка для регулирования и поддержания давления в камере осаждения;
- 7 – измеритель давления, связанный с дроссельной заслонкой; под термином «зазор» подразумевается расстояние от душевой газораспределительной системы до нагреваемого подложкодержателя

схема камеры с указанием основных её необходимых элементов показана на рис. 1. Необходимые величины рабочего давления в камере осаждения поддерживаются устройствами, называемыми «дроссельные заслонки» («throttle valve» или «butterfly valve»), соединёнными с прецизионными вакуумными измерителями. Аналогичная автоматическая кластерная установка следующего поколения DCVD Centura DxZ с индивидуальной камерой, принципиально аналогичной приведённой на рис. 1 (использован керамический нагреватель-подложкодержатель в отличие от металлического в первом случае), использовалась для разработки процесса в условиях субатмосферного давления и последовательно-импульсной подачи реагентов. Результаты этих исследований будут изложены в третьей части настоящей работы, однако в качестве базы для сравнения результатов было необходимо исследовать на той же установке основные закономерности процесса осаждения с непрерывной подачей реагентов; эти результаты приведены кратко в настоящей работе.

Современная организация поставки технологического оборудования для микроэлектронного производства подразумевает, что базовый технологический процесс в виде программы процесса (или «рецепта» процесса или «recipe») поставляется вместе с оборудованием. Такие рецепты базовых процессов ХОГФ диоксида кремния в системе ТЭОС- $O_3/O_2$  были изменены для обеспечения возможности проведения исследований в значительно более широких экспериментальных условиях. Далее процессы осаждения, реализованные на вышеупомянутых установках Precision-5000 и DCVD Centura DxZ, называются Метод 1 и Метод 2 соответственно; основные характеристики этих методов приведены в табл. 1. Отметим, что по Методу 1 были разработаны два оригинальных базовых одностадийных рецепта процессов осаждения P1 и P2 (табл. 2), а также рецепт для объединённого двухстадийного процесса P3, включающего последовательное исполнение рецептов P1 и P2. Разработанные базовые рецепты давали возможность провести большее число экспериментов в предварительно фиксированных условиях. Отметим, что подача паров ТЭОС и смеси озон-кислород осуществлялась отдельно. Напуск всех реагентов осуществлялся одновременно, а процесс проводился в течение заданного времени до требуемой толщины покрытия из диоксида кремния.

**Таблица 1**

Обобщённые данные по характеристикам процессов получения диоксида кремния при использовании тетраэтоксисилана и смеси озон-кислород (Метод 1 и Метод 2)

Параметр	Параметры процессов получения слоёв диоксида кремния	
	Метод 1	Метод 2
Обозначение	Метод 1	Метод 2
Установка для осаждения	Precision - 5000	DCVD Centura DxZ
Температура подложки (°C)	440	498
Давление рабочее (мм рт. ст.)	9.5 - 450	540
Расход ТЭОС (мг/мин)	400 - 1300	1000
Расход кислорода (см <sup>3</sup> /мин)	-	4000
Расход $O_2/O_3$ (см <sup>3</sup> /мин)	4000 - 5000	5000
Концентрация озона (масс. %)	8 – 12.4	16*
Расход носителя гелия (см <sup>3</sup> /мин)	1200 - 6000	6000
Суммарный расход газов (см <sup>3</sup> /мин)	8000 - 11000	15000
Зазор (мм)	5.8 – 7.6	8.9

\* Концентрация озона даётся для потока кислорода с озоном 5000 см<sup>3</sup>/мин.

**Таблица 2**

Некоторые параметры фиксированных рецептов процесса по Методу 1

Параметр	Параметры процессов получения слоёв диоксида кремния по Методу 1	
	P1 (первая стадия)	P2 (вторая стадия)
Обозначение	P1 (первая стадия)	P2 (вторая стадия)
Температура подложки (°C)	440	440
Давление рабочее (мм рт. ст.)	60*	450*
Расход ТЭОС (мг/мин)	475	520
Расход $O_2/O_3$ (см <sup>3</sup> /мин)	5000	5000
Концентрация озона (масс. %)	8.1 – 8.6	8.1 – 8.6
Расход носителя гелия (см <sup>3</sup> /мин)	1200	4000
Зазор (мм)	7.6	5.8

\* Рабочее давление для базового процесса. При исследованиях давление также поддерживали равным 9.5; 60; 200; 450 мм рт. ст.

Непосредственно после процесса осаждения согласно исходной рекомендованной технологии производителя оборудования следовал цикл очистки камеры путём её травления в потоке, содержащем атомы фтора, с последующим заращиванием стенок камеры слоем диоксида кремния (т.н. «seasoning») для удаления адсорбированного на внутренних поверхностях камеры фтора. Такой приём даёт возможность обеспечивать одинаковые стартовые условия для осаждения всех экспериментальных подложек.

Для осаждения использовали полированные подложки кремния диаметром 200 мм ориентации <100> p-типа с сопротивлением 1-50 Ом×см. Исходные кремниевые подложки имели на поверхности слой естественного оксида толщиной около 0.9 нм. При использовании дополнительной стандартной химической обработки подложек в растворе HF:H<sub>2</sub>O = 1:100 с последующей стандартной химической обработкой «RCA clean» толщина естественного оксида кремния составляла около 0.5 нм. В работе использовались различные материалы диэлектрических тонких слоёв, полученных на исходных подложках кремния. Эти материалы исследовались в связи с тем, что анализируемый тип диоксида кремния может быть использован в различных узлах ИМС, где возможно применение различных тонкослойных материалов и необходимо знать ростовые особенности тонких слоёв на них. Используемые тонкослойные материалы на подложках кремния показаны в табл. 3.

**Таблица 3**

Некоторые параметры использованных диэлектрических слоёв

Материал	Обозначение	Режим получения слоя на кремнии	Толщина слоя, нм
SiO <sub>2</sub>	ТДК	Термическое пирогенное окисление	39
	ПХДК	Плазменный, ТЭОС-O <sub>2</sub> , 440 °С	38-86
	ПДК	Термический, окислительный пиролиз ТЭОС, 680 °С	314
	БТДК	Быстрое термическое окисление	10
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	ТНК	Термический, аммонолиз дихлорсилана, 760 °С	200
Si <sub>x</sub> N <sub>y</sub> H <sub>z</sub>	ПНК	Плазменный, SiH <sub>4</sub> -N <sub>2</sub> , 400 °С	60

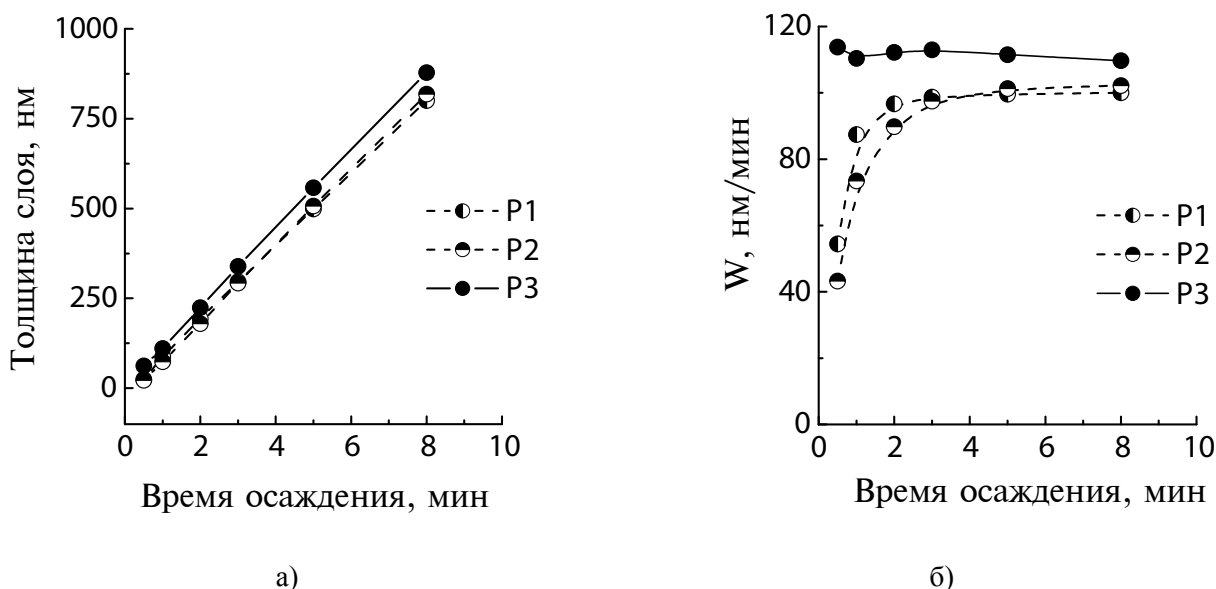
Толщины всех осаждённых слоёв измеряли на установках UV-1050 (Tencor Instruments, США) и OPTIPROBE 7341iXP (Thermowave, США) с усреднением данных замеров толщины по 49 точкам на подложке 200 мм; для многослойных покрытий использовали программы измерений составных слоёв с разной толщиной и различными показателями преломления. Анализ шероховатости поверхности диоксида кремния проводился с использованием атомно-силового микроскопа Digital Instruments Dimension 5000 Atomic Force Microscope (США). Для регистрации профилей скорости осаждения на ступеньках рельефа использовали электронный микроскоп XL 30 FEG (Philips, Германия).

### *Экспериментальные результаты и обсуждение*

*Кинетика осаждения слоёв по Методу 1 на поверхности кремния.* На рис. 2а отчётливо видна нестационарность процесса ХОГФ на начальных стадиях для рецептов Р1 и Р2, которая выражается в отклонении прямой, проведённой по экспериментальным точкам, от начала координат. На рис. 2б данные рис. 2а перестроены в виде зависимости скорости осаждения от длительности процесса ХОГФ и наглядно показывают, что на начальных стадиях процесса ХОГФ, примерно до 3 минут, скорости осаждения постепенно нарастают. В то же время осаждение слоёв в двухстадийном процессе по рецепту Р3 давало стационарный рост слоёв

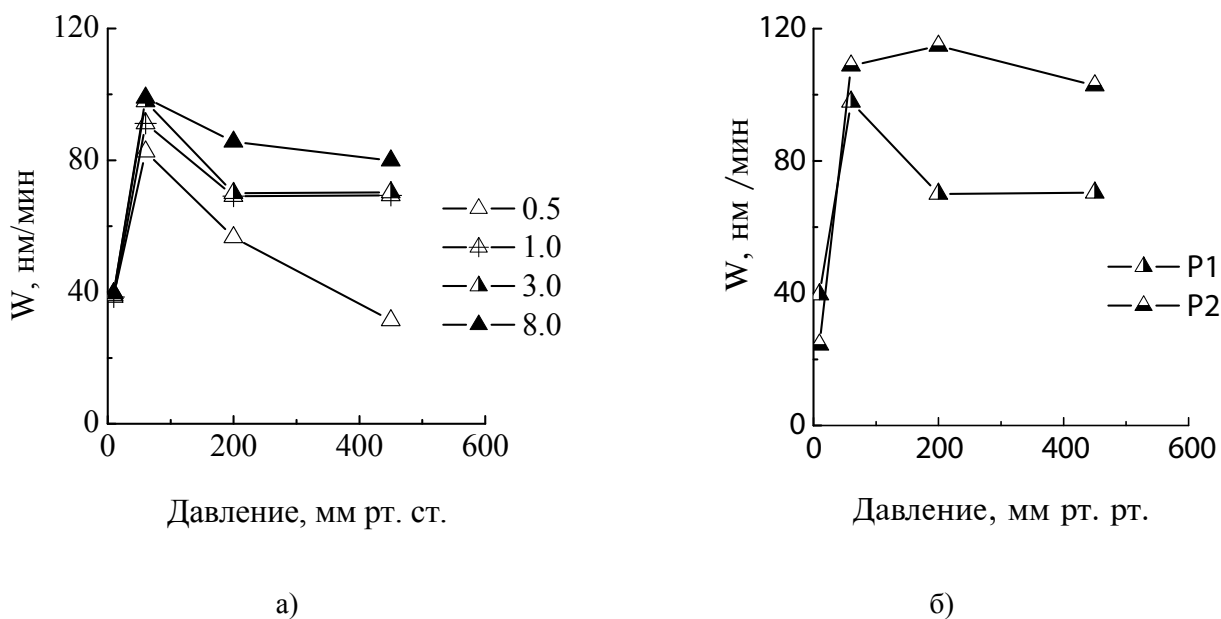
с практически постоянной скоростью роста (рис. 26). В целом при выбранных экспериментальных условиях скорость осаждения составляла около 100 нм/мин.

На рис. 3а,б показаны зависимости скорости осаждения от величины рабочего давления в процессе роста. Можно видеть резкий спад скорости наращивания при малых давлениях и стабилизацию скорости осаждения при давлениях в пределах 60-450 мм рт. ст.; при этом минимальная чувствительность процесса к длительности наращивания слоя наблюдалась при давлении примерно 100 мм рт. ст. (рис. 3а).



**Рис. 2**

Зависимость толщины слоя SiO<sub>2</sub> на кремнии от длительности процесса осаждения (а) и изменение величины скорости осаждения по ходу процесса (б) для различных базовых рецептов



**Рис. 3**

Зависимость скорости роста слоя SiO<sub>2</sub> при изменении давления в рецепте P1 (а) при разных длительностях процесса осаждения (мин) и изменение величины скорости осаждения при изменении давления в рецептах P1 и P2 при длительности процесса 3 минуты (б)

Кинетика осаждения слоёв по Методу 1 на разных типах диэлектрических материалов. На рис. 4а,б показаны зависимости скорости наращивания слоёв диоксида кремния на разных диэлектрических материалах для базовых рецептов Р1 и Р2. Можно видеть, что для рецепта Р1 с базовым давлением 60 мм рт. ст. разница в скоростях наращивания в сравнении со скоростью роста на кремнии намного меньше, чем для рецепта Р2, реализованного при повышенном давлении 450 мм рт. ст. При этом в двухстадийном процессе осаждения по рецепту Р3 для всех исследованных материалов скорости осаждения оказываются постоянными в ходе процесса осаждения. Итоговые данные по соотношениям скоростей осаждения на разных материалах сведены в табл. 4.

Таблица 4

Отношения скоростей наращивания на некоторых материалах к скоростям наращивания на монокристаллическом кремнии при разных экспериментальных условиях для длительности процесса осаждения 3 мин. Обозначения материалов приведены по табл. 3

Материал	Рецепт Р1 при давлениях, мм рт. ст.			Рецепт Р2 при давлениях, мм рт. ст.			Рецепт Р3
	60	200	450	60	200	450	
Si, нм/мин	98.7	70.0	70.2	108.8	114.8	102.8	113.0
ТДК/Si	0.75	0.66	0.54	0.87	0.44	0.67	0.62
ПХДК/Si	0.78	0.76	0.54	-	-	-	0.50
ПДК/Si	-	-	-	-	-	0.57	0.67
ТНК/Si	0.78	0.48	0.53	0.86	0.68	0.54	0.66
ПНК/Si	0.80	0.89	-	-	-	-	-

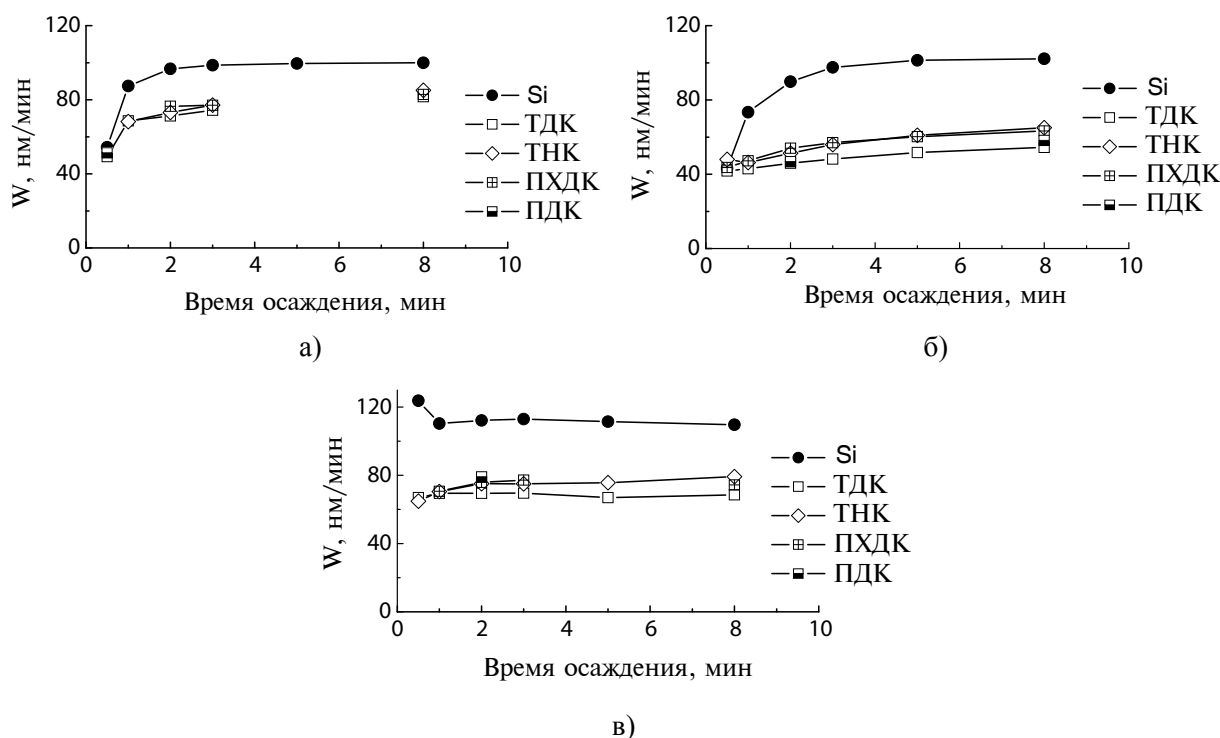


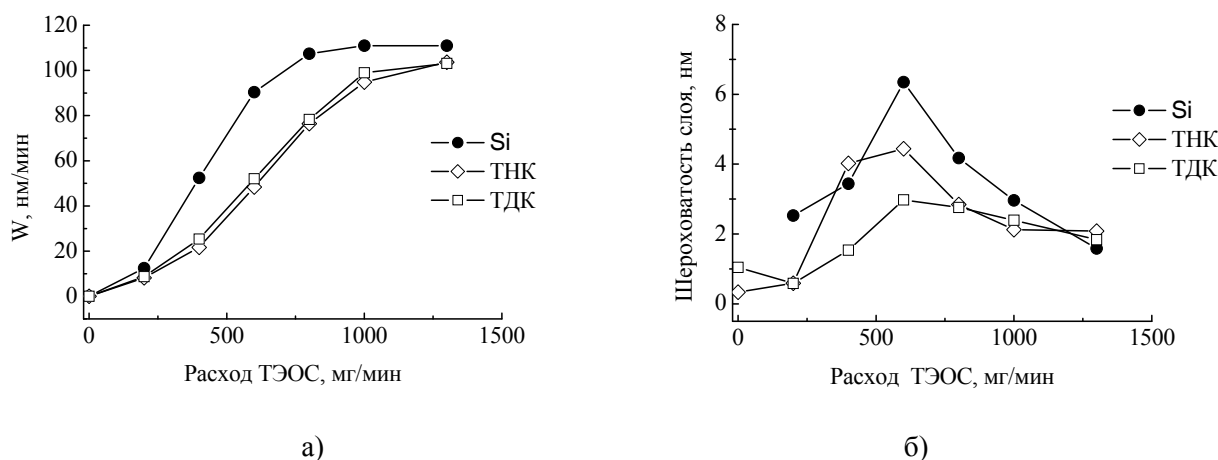
Рис. 4

Зависимость толщины слоя  $\text{SiO}_2$  от времени процесса осаждения (а) для базовых процессов Р1 (а), Р2 (б) и Р3 (в) для различных диэлектрических материалов на кремнии (см. обозначения в табл. 3)

Сравнение показывает, что на всех изученных материалах скорость осаждения диоксида кремния оказывалась существенно меньше в сравнении с таковой на поверхности монокристаллического кремния. Это означает, что, используя для изготовления структур комбинации различных материалов, можно управлять скоростью наращивания слоёв диоксида кремния в системе ТЭОС- $O_3/O_2$  и, например, при блокировке верхних частей ступенек в кремнии нитридом или диоксидом кремния намного быстрее заполнять канавки в кремнии, обеспечивая таким образом самопланаризацию структур.

Обработка большого массива полученных в различных режимах экспериментальных данных показала, что прослеживалось влияние расхода ТЭОС на скорость осаждения (такие данные в явном виде в литературе ранее опубликованы не были). С использованием базового рецепта Р1 была проверена зависимость скорости осаждения от величины расхода ТЭОС (рис. 5а) [2]. Можно видеть, что скорости осаждения на поверхностях диоксида кремния и нитрида кремния практически совпадают, а при величине расхода ТЭОС около 600 мг/мин имеет место максимальный эффект «поверхностной чувствительности» как для подслоя термического диоксида кремния, так и для подслоя нитрида кремния по отношению к поверхности кремния. При этом отметим, что «селективный» рост имел место только для процесса ХОГФ диоксида кремния. В случае силикатных стёкол, когда к смеси ТЭОС- $O_3/O_2$  добавляются эфиры фосфорной и борной кислот, эффект «поверхностной чувствительности» исчезал [6].

*Свойства слоёв, полученных по Методу 1.* Величины показателя преломления слоёв диоксида кремния находились в пределах 1.44, несколько отличаясь в третьем знаке.



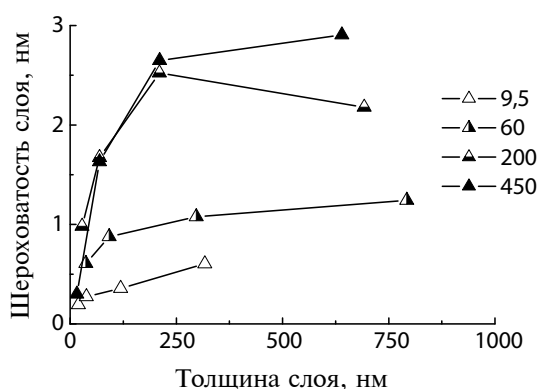
**Рис. 5**

Зависимости скорости осаждения (а) и шероховатости поверхности осаждённого  $SiO_2$  (б) на разных поверхностях от потока ТЭОС для рецепта Р1 с изменениями: давление – 200 мм рт. ст., концентрация  $O_3$  в  $O_2$  – 12.4 масс.%, длительность осаждения – 4 мин

Исследования шероховатости поверхности слоёв  $SiO_2$  проводились на всех полученных образцах диоксида кремния. Трактовка результатов оказалась затруднительной в связи с тем, что толщины осаждённых слоёв варьировались в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров. Например, толщины слоёв  $SiO_2$  при снятии зависимости от расхода ТЭОС, представленной на рис. 5а, возрастали от 50 до 450 нм для поверхности кремния и от 32 до 410 нм для подслоёв нитрида кремния и термического диоксида кремния. При этом величины шероховатости поверхности полученных слоёв обнаруживали

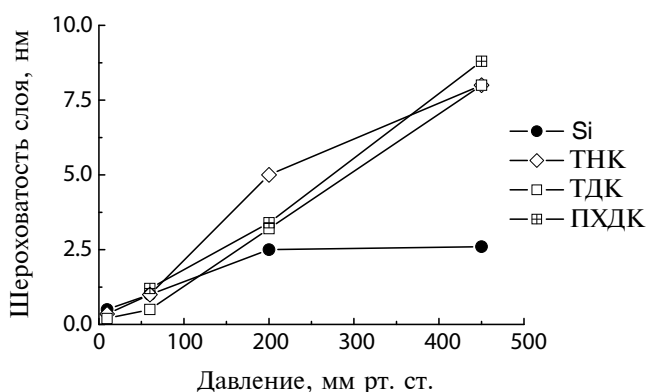
явные области нарастания, максимума и спада, как показано на рис. 5б, не коррелируя с толщиной слоёв. Таким образом, в данном эксперименте доминирующим фактором влияния на шероховатость был расход ТЭОС. Существенно отметить, что при этом для слоёв силикатных стёкол, выращенных в близких режимах, имели место примерно в 3-5 раз большие скорости осаждения с примерно на порядок меньшей шероховатостью поверхности осаждённых слоёв стёкол независимо от типа нижележащего материала.

Напротив, при обработке результатов, полученных в базовых рецептах при фиксированном расходе ТЭОС, прослеживалась зависимость шероховатости покрытия от толщины слоя. Такая зависимость приведена на рис. 6 для слоёв, полученных по рецепту Р1 при разных рабочих давлениях. Можно видеть, что при толщине примерно 200 нм величины шероховатости поверхности стабилизируются. Это наблюдение позволило предположить, что полученные величины шероховатости для сравнения могут быть непротиворечиво нормированы на толщину слоёв, что позволило бы исключить влияние толщины слоя. С учётом упомянутой нормировки зависимость шероховатости слоёв от давления представлена на рис. 7. Можно видеть, что шероховатость покрытий существенным образом возрастала с ростом рабочего давления в процессе осаждения.



**Рис. 6**

Зависимости шероховатости поверхности слоёв SiO<sub>2</sub> от толщины слоёв, полученных по рецепту Р1 при разных давлениях (мм рт. ст.)



**Рис. 7**

Зависимость шероховатости слоя диоксида кремния от давления для разных нижележащих поверхностей (см. обозначения в табл. 3) при использовании рецепта Р1 и нормировки величин шероховатости к толщине слоя диоксида кремния 200 нм

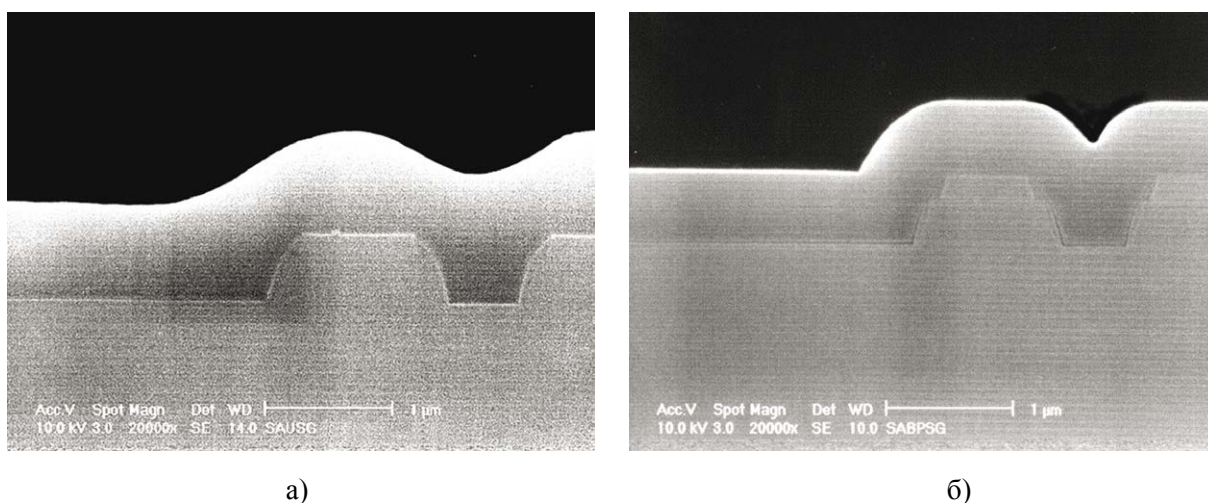
Усадка слоёв (процентное отношение разности толщин до и после термического отжига к исходной толщине слоя) исследовалась после термического отжига образцов при 1050 °С в азоте в течение 30 минут. Сравнительные данные по слоям, полученным на поверхности кремния по рецептам Р1 и Р2, были следующими при давлениях 9,5, 60, 200 и 450 мм рт. ст.: 7,6 и 7,8; 7,0 и 7,6; 6,7 и 6,3; 4,0 и 5,9 (в %).

Скорости растворения слоёв, полученных по рецепту Р3, исследовались в стандартных растворах разбавленной 100:1 и 10:1 фтористоводородной кислоты (DHF) после осаждения и термических отжигов при 850 и 1050 °С в азоте в течение 30 минут. Полученные величины для DHF (100:1) после осаждения и отжига при 850 °С и 1050 °С составляли 18,1, 7,0 и 2,8 нм/мин соответственно, а для DHF (10:1) после отжига при 850 °С и 1050 °С 67,3 и 29,5 нм/мин соответственно.



Таким образом, согласно полученным данным усиление эффекта «поверхностной чувствительности» имело место при некотором определённом потоке ТЭОС и повышении рабочего давления в процессе. С этим эффектом коррелирует максимальная шероховатость покрытий при нанесении на подложки диоксида кремния и нитрида кремния в сравнении с осаждением диоксида кремния на поверхность кремния.

*Рост слоёв на ступенчатых рельефах.* В литературе приведено достаточно информации о закономерностях роста слоёв диоксида кремния при разных концентрациях озона в смеси (см. обзор в [1]). Так увеличение концентрации озона приводит к появлению «сглаженных» («flow-like») профилей (рис. 8а), в то время как при малых концентрациях озона, а также при выращивании слоёв силикатных стёкол в близких режимах профили роста слоёв обычно конформные (рис. 8б).



**Рис. 8**

Примеры роста слоёв на тестовых структурах, имитирующих поверхностные канавки в кремнии: типичный «flow-like» профиль (а) и конформный профиль (б) [2]

*Осаждение слоёв по Методу 2.* При указанных для Метода 2 условиях скорость осаждения слоёв диоксида кремния также обнаруживала зависимость от типа поверхности нижележащего материала. Для подложки кремния <100> с толщиной естественного оксида около 0.9 нм скорость осаждения диоксида кремния составляла 64.2 нм/мин, для слоя быстрого термического диоксида кремния (БТДК) толщиной 10 нм на кремнии – 52.6 нм/мин, для слоя низкотемпературного плазменного нитрида кремния (ПНК) – 56.8 нм/мин. Таким образом, соотношение скоростей роста слоя на поверхности кремния и диоксида кремния в указанных условиях составляло ~ 0.8 - 0.9. Это в целом соответствует литературным данным и вышеописанным данным для Метода 1 (табл. 4), хотя и несколько отличается по абсолютной величине. Разницу можно объяснить несколько повышенным расходом ТЭОС в процессах по Методу 2 (1000 мг/мин), что по данным рис. 4а соответствует области снижения эффекта «поверхностной чувствительности», а также несколько большей температурой осаждения во втором исследованном случае, что по данным [8] снижает эффект «поверхностной чувствительности».

### **Заключение**

С использованием промышленного оборудования в широком диапазоне экспериментальных условий ХОГФ проведены многофакторные исследования закономерностей роста слоёв диоксида кремния при низкой температуре окислением ТЭОС смесью озона и кислорода в условиях субатмосферного давления и непрерывной

---

подачи реагентов в реактор. Определены режимы стационарности роста слоёв диоксида кремния, найдены величины скоростей осаждения на подложках диаметром 200 мм с диэлектрическими слоями различной природы, позволившие количественно охарактеризовать эффект «поверхностной чувствительности» исследованного процесса ХОГФ. В исследованных режимах получены микрофотографии профилей осаждения на тестовых структурах с реальным рельефом интегральных микросхем, в том числе «сглаженные» профили, дающие основания для разработки технологии осаждения, обеспечивающей заполнение узких зазоров рельефа ИМС.

В следующей части работы будут рассмотрены результаты экспериментальных исследований закономерностей роста слоёв диоксида кремния при низкой температуре окислением ТЭОС смесью озона и кислорода в условиях субатмосферного давления и последовательно-импульсной подачи реагентов в реактор. Такие исследования, проведённые с использованием прецизионного автоматического оборудования для ХОГФ, по мнению автора, могут быть основой для разработки высокоэффективного процесса осаждения диоксида кремния для структур с «агрессивными» аспектными отношениями, в том числе процесса в режиме АСО.

### *Литература*

1. Васильев В.Ю. Низкотемпературное осаждение из газовой фазы при субатмосферном давлении слоёв диоксида кремния окислением тетраэтоксисилана смесью озон-кислород для применения в субмикронных интегральных микросхемах. Часть 1. Обзор состояния, направлений и задач исследования // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы.* – 2013. – Вып. 1(230). – С. 76-87.
2. Vassiliev V.Y., Zheng J.-Z. The Investigation on the Deposition Kinetics of Sub-Atmospheric Pressure Glass Films // *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on IC Technology, Systems and Application (ISIC-97).* – 1997. – Singapore. – P. 522-525.
3. Sudijono J.L., Vassiliev V.Yu., Zheng J.-Z. A Comparative Study of TEOC-based Chemical Vapor Deposition Techniques for Shallow Trench Isolation Technology // *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on IC Technology, Systems and Application (ISIC-97).* – 1997. – Singapore. – P. 597-600.
4. Васильев В.Ю. Низкотемпературное осаждение слоёв диоксида кремния в условиях субатмосферного давления окислением тетраэтоксисилана смесью озон-кислород при последовательно-импульсном напуске реагентов // *Сборник тезисов Третьего семинара по проблемам химического осаждения из газовой фазы.* – 23-29 июня 2013. – Турбаза Тойнак. Иркутская область. Российская Федерация.
5. Vassiliev V.Y., Zheng J.Z., Tang S.K., Lu W., Hua J. and Lin Y.S. Growth Kinetics and Deposition-Related Properties of Subatmospheric-Pressure Chemically Vapor Deposited Borophosphosilicate Glass Films // *J. Electrochem. Soc.* – 1999. – Vol. 146. – N 8. – P. 3039-3051.
6. Tang S.K., Vassiliev V.Y., Mridha S. and Chan L. Investigation of Borophosphosilicate Glass Roughness and Planarization With the Atomic Force Microscope Technique // *Thin Solid Films.* – 1999. – Vol. 352. – N 1-2. – P. 77-84.
7. Applied Materials Inc. The Precision 5000 Story // *Solid State Technology.* – 1997. – Vol. 40. – N 5. – P. 117-126.
8. Xia L.Q., Nemani S., Galiano M., Pichai S., Changan S., Yieh E., Cote D., Conti R., Restano D., Tobben D. High Temperature Subatmospheric Chemical Vapor Deposited Undoped Silicate Glass. A Solution for Next Generation Shallow Trench Isolation // *J. Electrochem. Soc.* – 1999. – Vol. 146. – N 3. – P. 1181-1185.