

ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ОКСИДА КРЕМНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННОЙ АКТИВАЦИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

О. Ю. Наливайко¹, А. С. Турцевич², Г. В. Лепешкевич¹, Е. Н. Пшеничный¹

¹) ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца И.П., 121А, Минск, Беларусь, e-mail: onalivaiko@integral.by

²) Министерство Промышленности РБ, пр. Партизанский, 2/4, 2200033 Минск, Беларусь

Показано, что с увеличением диаметра пластин и уменьшением проектных норм для осаждения пленок оксида кремния с плазменной активацией предпочтительным становится использование реакторов поштучной обработки. Использование таких реакторов позволяет существенно сократить длительность обработки пластин, повысить однородность и воспроизводимость свойств получаемых пленок. Представлены основные тенденции процессов осаждения пленок оксида кремния с применением моносилана и тетраэтоксисилана. Результаты могут быть использованы для производства электронных компонентов.

Ключевые слова: пленки оксида кремния; осаждение.

PLASMA ENHANCED DEPOSITION OF SILICON OXIDE FILM FOR PRODUCING OF INTEGRATED CIRCUITS

O. Y. Nalivaiko¹, A. S. Turtsevich², G. V. Lepeshkevich¹, E. N. Pshenichny¹

¹) JSC «INTEGRAL» – Holding Management Company 121A, Kazintsa I.P. Str.,
Minsk, 220108, Belarus

²) The Ministry of Industry of the Republic of Belarus, Partizansky av., 2/4, 2200033 Minsk, Belarus,
Corresponding author: O. Y. Nalivaiko (onalivaiko@integral.by)

It was shown that the single wafer reactors are getting preferable for plasma enhanced deposition of silicon oxide films as wafer diameter is increased and design ruled are decreased. They allow to improve the uniformity and repeatability of obtained films and to make shorter the duration of wafer processing. It were presented the main process trends for deposition of silicon oxide using silane and tetraethylorthosilicate. These results can be used by process engineers.

Key words: silicon oxide films; deposition.

ВВЕДЕНИЕ

Химическое осаждение из газовой фазы диэлектрических пленок применяется при производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем для различных целей. Первоначально такие пленки создавались для пассивирования поверхности кристаллов, при этом осаждение проводилось при низкой температуре с использованием моносилана (SiH_4) и кислорода [1–3]. В настоящее время широко применяется тетраэтоксисилан (ТЭОС) – реагент в форме жидкого прекурсора. Несмотря на то, что первоначально ТЭОС использовался при относительно высоких температурах ($> 650^\circ\text{C}$), сегодня он применяется в процессах осаждения с плазмен-

ной активацией, а также в процессе осаждения при субатмосферном давлении вместе с озоном.

Процессы осаждения с плазменной активацией (ПХОГФ) позволяют проводить реакции осаждения при более низких температурах по сравнению с процессами осаждения при пониженном атмосферном давлении за счет использования энергии плазменного высокочастотного (ВЧ) разряда, при котором создаются более реакционноспособные радикалы [1, 3]. Кроме того, применение плазменного разряда позволяет повысить скорость осаждения пленок по сравнению с термическими процессами. В качестве реагентов используются моносилан и закись азота (N_2O) или ТЭОС и кислород.

Процесс ПХОГФ зависит от многих параметров, включая обычные параметры, такие как потоки и соотношение потоков газов, температура подложки, давление, а также уровень ВЧ-мощности, частота и длительность цикла подачи ВЧ-мощности. В настоящее время имеется четыре типа реакторов для процессов осаждения с плазменной активацией [2, 4]: 1) радиальный реактор с параллельными электродами, 2) горизонтальный трубчатый реактор, 3) реактор поштучной обработки и 4) системы с одним реактором, имеющим несколько позиций для осаждения.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ ПХОГФ процессов осаждения пленок оксида кремния с использованием моносилана и ТЭОС на различных типах оборудования.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния КДБ12 диаметром 150 мм с ориентацией (100). Исследования проводилось на трех типах установок:

1) В горизонтальном реакторе пониженного давления с горячими стенками с дисковой многоэлектродной системой «Изоплаз-2-150М» [5] (с моносиланом и закисью азота).

2) На установке Concept-1 (ф. Novellus) с одним реактором, имеющим несколько позиций для осаждения (рис. 1, а).

3) На установке Precision-5000CVD (ф. Applied Materials) с реакторами поштучной обработки (рис. 1, б).

Толщина пленок определялась при помощи спектрофотометрии. Величина показателя преломления определялась при помощи лазерного эллипсометра.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные характеристики процессов осаждения и получаемых пленок оксида кремния приведены в таблице. представлены в таблице 1. Видно, что скорость осаждения в горизонтальном трубчатом реакторе более чем на порядок ниже, чем в реакторах поштучной обработки (40 нм/мин против 260 и 800 нм/мин). Это приводит к длительному (1,5–2 часа) температурному воздействию на пластины, что может привести к образованию шипов на алюминиевой металлизации (при формировании межслойного диэлектрика). Применение дисковой многоэлектродной системы (МЭС) позволило повысить максимальную загрузку пластин диаметром 150 мм с 32 до 56 пластин при сохранении длины рабочей зоны без изменений, а также улучшить условия загрузки пластин в МЭС и снизить привносимую дефектность [5]. Тем не ме-

нее, трубчатые реакторы страдают от эффекта обеднения, хотя неоднородность осаждения может быть минимизирована за счет использования градиента температуры вдоль реактора. Однородность толщины пленок оксида кремния по пластине составляет $\pm 4,2\%$ по сравнению с $\pm 2,3\%$ и $\pm 1,5\%$ на установках Concept-1 и Precision-5000. Показатель преломления и механические напряжения пленок оксида кремния и нитрида кремния, полученные на установке «Изоплаз-150», практически идентичны значениям, получаемым на установках поштучной обработки с использованием моносилана. Установка «Изоплаз-2-150М» позволяет получать пленки, удовлетворяющие требованиям для изделий с минимальными размерами до 1,0 мкм. Однако с увеличением диаметра обрабатываемых пластин и ужесточением проектных норм становится очевидной необходимость применения реакторов с поштучной обработкой пластин.

Таблица 1

Сравнение параметров процессов осаждения и свойств пленок оксида кремния

| Параметр процесса | Изоплаз-2 | Concept-1 | | Precision 5000 | | |
|-------------------------------------|-------------|----------------------|------------------|----------------|------------------|-------------------|
| | | SiH ₄ | SiH ₄ | ТЭОС | SiH ₄ | ТЭОС |
| Тип обработки | групповая | поштучная, послойная | | поштучная | | |
| Тип нагрева | резистивный | резистивный | | ламповый | | |
| Температура, °С | 350 | 400 | 350 | 400 | 380 | 370 |
| Давление, мм рт.ст. | 0,76-0,84 | 2,4 | 2,4 | 2,8 | 8,2 | 450 без плазмы |
| Скорость осаждения, нм/мин | 40 | 230-290 | 500-550 | > 800 | > 750 | > 240 |
| Однородность толщины по пластине, % | < $\pm 4,2$ | < $\pm 2,3$ | < $\pm 2,3$ | < $\pm 1,5$ | < $\pm 1,5$ | < $\pm 2,5$ |
| Показатель преломления | 1,45-1,50 | 1,45-1,48 | 1,45-1,48 | 1,45-1,48 | 1,45-1,48 | 1,42-1,46 |
| Механические напряжения, МПа | 50-100 | 50-150 | 50-150 | <50 | 50-100 | <350 |

На установках Concept-1 реакционная камера имеет шесть позиций с резистивным нагревом подложек (рис. 1, а), на каждой из которых осаждается одна шестая часть конечной толщины пленки. Несмотря на то, что скорость осаждения пленок оксида кремния на установке Concept-1 в 3 раза (для SiH₄) и в 1,5 раза (для ТЭОС) ниже по сравнению с установкой Precision-5000 производительность этих установок практически одинаковая, так как на установке Concept-1 обрабатывается одновременно 6 пластин. На установках Concept-1 на одном реакторе может использоваться

и моносилан и ТЭОС, однако как показывает практика, при переходе с одного реагента на другой может происходить увеличение привносимой дефектности.

В тоже время на установке Precision 5000 (рис. 1, б) могут использоваться различные реакторы для работы с SiH_4 и ТЭОС. При этом каждый реактор имеет собственную газовую панель для подачи газов. Кроме того, в реакторе, работающем с ТЭОС можно проводить и процесс осаждения при субатмосферном давлении (ХОГФ САД) без плазменной активации. Для этого применяется универсальный реактор для процессов с ТЭОС (Universal TEOS Chamber) [2]. Для улучшения процесса заполнения сложного топологического рельефа используется смесь ТЭОС/озон (O_3). Подача паров ТЭОС в реактор осуществляется при помощи газовой панели с системой инжестирования жидкости. Универсальный реактор позволяет последовательно проводить процессы ХОГФ САД и ПХОГФ, что исключает воздействие атмосферной влаги на пленку, полученную при субатмосферном давлении. Для очистки внутренних поверхностей реакционной камеры применяется плазменная обработка. Таким образом, установки поштучной обработки являются более гибкими в технологическом плане, позволяют существенно уменьшить температурное воздействие на пластины, повысить однородность и воспроизводимость получаемых пленок оксида кремния. Также возможно управление механическими напряжениями получаемых пленок.

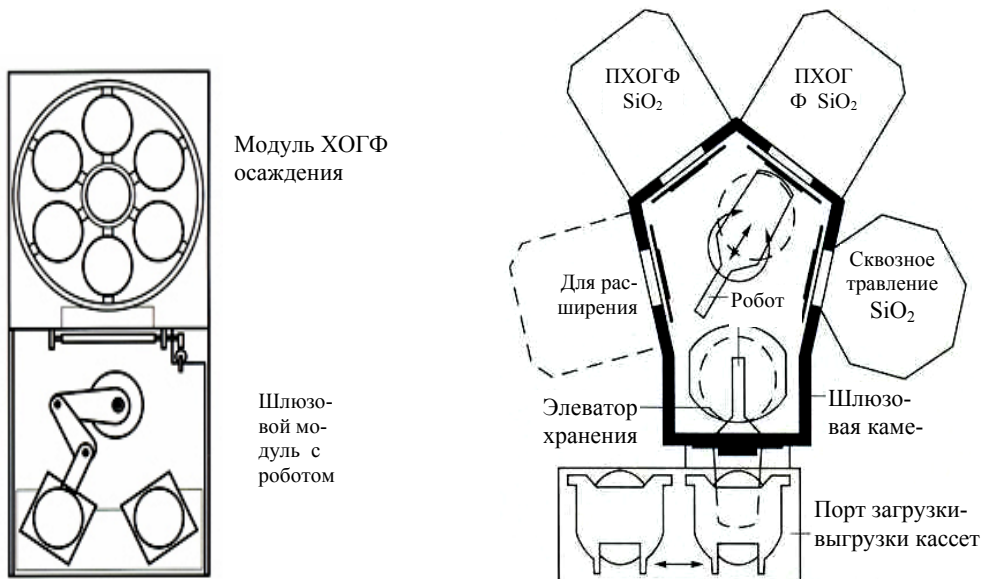


Рисунок 1. – Конфигурации установок для осаждения пленок с плазменной активацией:
а) установка Concept-1 фирмы Novellus и
б) установка Precision-5000 CVD фирмы Applied Materials [2]

В таблицах 2 и 3 представлены обобщенные данные по влиянию условий процессов осаждения пленок оксида кремния с использованием SiH_4 и ТЭОС на свойства получаемых пленок.

Необходимо отметить, что указанные в таблицах 2 и 3 зависимости действуют только рамках «окна процесса», специфицированного фирмой-изготовителем оборудования.

Таблица 2

Влияние условий процесса осаждения нелегированных пленок оксида кремния с использованием SiH₄ на свойства пленок

| Условия процесса Влияние увеличения | Характеристики пленки | | | | |
|---|----------------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| | Однородность толщины по пластине | Скорость влажного травления | Скорость осаждения | Показатель преломления | Механические напряжения |
| Общая RF мощность | = | ↓ | ↑ | ↓ | ↓ |
| Температура | ↓ | ↓ | ↑ | = | = |
| Давление | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ |
| Поток SiH ₄ | ↓ | = | ↑ | ↑ | ↑ |
| Соотношение N ₂ O/SiH ₄ | ↓ | = | ↓ | ↓ | ↓ |
| Поток N ₂ | = | = | = | ↑ | ↑ |
| Общий поток газов | ↓ | = | ↑ | ↑ | ↑ |

- ↑ Величина возрастает, однородность ухудшается; film becomes more tensile
 ↓ Величина уменьшается, однородность улучшается; film becomes more compressive
 = Практически не влияет

Таблица 3

Влияние условий процесса осаждения нелегированных пленок оксида кремния с использованием ТЭОС на свойства пленок

| Условия процесса Влияние увеличения | Характеристики пленки | | | | |
|--|----------------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| | Однородность толщины по пластине | Скорость влажного травления | Скорость осаждения | Показатель преломления | Механические напряжения |
| % мощности низкочастотного генератора | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |
| Общая RF мощность | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | ↓ |
| Частота низкочастотного генератора | = | = | = | = | = |
| Температура | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |
| Давление | = | ↑ | = | ↓ | = |
| Поток ТЭОС | ↓ | ↑ | ↑ | ↓ | ↑ |
| Поток O ₂ | ↓ | ↑ | ↑ | = | ↓ |

При выходе за пределы «окна процесса» они перестают действовать. На установках с поштучной обработкой имеется функция калибровки регуляторов расхода газа, которая регистрирует изменение давления при изменении потока газа и за счет этого оценивает реальный отток газа. В связи с этим очень важным является своевременная замена датчиков давления (деформационных емкостных преобразователей давления), которые со временем засоряются и начинают выдавать неправильные показания (установка всегда обрабатывает заданное давление, но при этом реальное давление существенно отличается от отображаемого системой). Выход за пределы «окна процесса» можно отслеживать по изменению скорости осаждения, показателя преломления или механических напряжений, при этом действия по таблицам 2 и 3 уже не позволяют выйти на требуемые параметры процесса осаждения пленок оксида кремния. Также необходимо своевременно проводить калибровку ВЧ-генератора и замену подложкодержателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с увеличением диаметра пластин и уменьшением проектных норм для осаждения пленок оксида кремния с плазменной активацией предпочтительным становится использование реакторов поштучной обработки. Использование таких реакторов позволяет существенно сократить длительность обработки пластин и повысить однородность и воспроизводимость свойств получаемых пленок. Представлены основные тенденции процессов осаждения пленок оксида кремния с применением моносилана и тетраэтоксисилана. Полученные результаты имеют практическое значение для технологов производств электронных компонентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии в 3-х кн. / под ред. А.С. Турцевича, Минск: Интегралполиграф. — 2013. — т.1, С.545–568.
2. Емельянов, В.А. Оборудование для химического осаждения из газовой фазы функциональных слоев / В.А. Емельянов, А.С. Турцевич, О.Ю. Наливайко // Минск: Белорусская наука. – 2007. – 255 с.
3. Плазменная технология в производстве СБИС / под ред. Н.Айспрука, Д.Брауна. – М.:Мир, 1987. – С.92.
4. Rosler R.S. The evaluation of commercial plasma enhanced CVD systems // Solid State Technology. – 1991. – №6. – P.67–71.
5. Турцевич, А.С. Процессы плазмохимического осаждения диэлектрических пленок на установке Изоплаз 2-150М / А.С. Турцевич, О.Ю.Наливайко, Л.П.Ануфриев // Вакуумная техника и технология. – 2005. – Т.15, № 4. –С.327–335.