

## Библиографический список:

- 1. Барыбин А.А., Сидоров В.Г. Физико-технологические основы электроники. – СПб.: Лань. – 2001.
- 2. Патент РФ №2174292. Устройство для отвода тепла и термостабилизации электронных плат // Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Аминов Г.И., Юсуфов Ш.А., 2001.

## УДК 631.582

Исмаилов Т.А., Захарова П.Р., Шангереева Б.А., Шахмаева А.Р.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ПЛЕНОК $SIO_2$

Ismailov T.A., Zakharova P.R., Shangereeva B.A., Shakhmaeva A.R.

# RESEARCH PROCESS PLASMA ETCHING SIO<sub>2</sub> MEMBRANE

B статье рассматриваются результаты плазмохимического травления диоксида кремния во фторсодержащей среде при изготовлении полупроводниковых приборов. Поставлено и рассмотрено решение задачи получения сглаженного микрорельефа контактных окон в  $SiO_2$  других материалах. Решение

поставленной задачи тесно связано с решением проблемы изотропного плазмохимического травления, когда скорость бокового (горизонтального) травления равна скорости вертикального, что позволяет получать сглаженные стенки структур при максимальном уходе размеров на границе с фоторезистом или другим маскирующим покрытием.

**Ключевые слова:** подложка, ионно-плазменная обработка, плазмохимическое травление.

The article discusses the results of plasma chemical etching of silicon dioxide in the fluorine-containing medium in the manufacture of semiconductor devices. Delivered and processed to obtain the solution of the smoothed microrelief contact windows in SiO2 other materials. The solution of the problem is closely connected with the problem of an isotropic plasma chemical etching, when the rate of lateral (horizontal) equal to the speed of the vertical etching, which allows to obtain smooth wall structures with maximum care dimensions on the border with photoresist or other masking coating.

Key words: substrate, ion-plasma treatment, plasma chemical etching.

**Введение.** Процессы селективного травления являются критичными при достижении микронных размеров полупроводниковых приборов, поскольку во многом определяют надежность и выход годных изделий. Для качественной металлизации ПП необходимо обеспечить выполнение высокой локальности травления окон в сочетании с гладким рельефом. Это достигается использованием параллельно двух процессов травления – изотропного и анизотропного.

Для решения задач контроля качества монтажа современных полупроводниковых изделий широко пользуются методом контактных окон с вертикальным профилем подложки.

Однако, при использовании контактных окон с вертикальным профилем стенок возрастает вероятность отказа полупроводниковых приборов из-за низ-кого коэффициента запыления металлизации.

#### Постановка задачи

Существуют также технологические методы, так называемого «профилирования контактных окон» при реализации которых удается модифицировать профиль окна таким образом, что боковые стенки его становятся полностью или частично наклонными ( $\alpha \neq 90^{\circ}$ ).

Маршрут формирование контактных окон представляет собой достаточно громоздкий набор операций, выполняемый на различном оборудовании, что естественно увеличивает вероятность образования дополнительных дефектов.

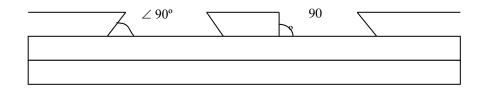


Рисунок 1 - Модифицированный профиль

Другим способом травления контактных окон является выполнение изотропного плазмохимического травления в одном вакуумном цикле с анизотропным процессом травления.

### Методы испытаний

Травление слоев SiO<sub>2</sub> проводилось в установке плазмохимического травления «ПХТ». Для осуществления процесса ИПХТ использовался керамический с ВЧ - индуктором реактор, т.е. реактор на базе высокочастотной без электродной разрядной системы, позволяющей получать высокую концентрацию радикалов фтора, достаточную, в принципе, для получения скорости травления SiO<sub>2</sub> -0.2 мкм/мин и выше, в зависимости от покрытия не планарной стороны обрабатываемой пластины. Травились пленки термического SiO<sub>2</sub> толщиной 0.8-1.2 мкм с фоторезистивной маской толщиной 1.5-2.0 мкм, сушку которой проводили при температуре 383. К, а также с маской из алюминия толщиной 0.54 мкм. Профиль и высоту канавок травления определяли в растровом электронном микроскопе Stereos can-360, толщину пленок оценивали на лазерном элипсометре ЛЭМ -2, плотность дефектов оценивалась в осветителе ИО-24 и в измерителе дефектности Surfscan-4500.

Как отмечалось выше обеспечение надежности разводки СБИС, при уменьшении размеров≤1.0 мкм сопряжено с необходимостью формирования в межуровневом диэлектрике контактных окон со сглаженными краями. Это предоставляется возможным лишь благодаря минимальному воздействию ионов на обрабатываемую поверхность, т.е. в условиях более высокого давления ≥ 100 Па и минимальной величине ВЧ – напряжения. При этом, предусматривается возможность использования вакуумных камер как можно большего объема, чтобы края электрода были удалены от стенок камеры как минимум на 10 см при общем давлении газовой смеси ≥ 100 Па. В этих условиях процесс плазмохимического травления является процессом химического взаимодействия атомов фтора и активных радикалов с поверхностью обрабатываемой пластины. Взаимодействие газовых частиц с поверхностью (например, для SF\*5) происходит через следующие стадии:

Недиссоциативная адсорбция

$$SF^*_{5(ra3)} + SiO_2 \rightarrow SF^*_{5(agc)} + SiO_2$$
 (1)

Диссоциативная адсорбция

$$SF*_{5(a,c)} + SiO_2 \rightarrow S_{(a,c)} + 5F_{(a,c)} + SiO_2$$
 (2)

Образование молекулярного продукта

$$5F_{(a,c)} + 2SiO_2 \rightarrow SF_{4(a,c)} + SiFO_4$$
 (3)

Десорбция молекулярного продукта

$$2SiFO_{4(agc)} \rightarrow SiF_{4(ras)} + 4O_{2(ras)}$$
 (4)

Удаление остатков

$$Si_{(a \perp c)} + 4F \rightarrow SiF_{4}_{(\Gamma a 3)}. \tag{5}$$

Кроме того, при изотропном плазмохимическом травлении, имеющая место, хотя и слабая ионная бомбардировка усиливает травление поверхности кремния благодаря тому, что реакционные частицы, такие как атомарный фтор, образуются на поверхности подложки, в результате ионно-индуцированной диссоциации нейтральных молекул и радикалов, которые были первоначально адсорбированы из газовой фазы. Соответственно освобождающиеся реакционные частицы тут же образуют связи Si-F без какой-либо миграции по поверхности.

Задача получения сглаженного микрорельефа контактных окон в  $SiO_2$  как и в других материалах, тесно связана с решением проблемы изотропного плазмохимического травления, когда скорость бокового (горизонтального) травления равна скорости вертикального, что позволяет получать сглаженные стенки структур при максимальном уходе размеров на границе с фоторезистом или другим маскирующим покрытием. Скорость процесса травления ( $V_{TP}$ ) и геометрия профиля в этом случае определяются: общим давлением ( $P_{of}$ ) газовой смеси и парциальным давлением ( $P_{nap}$ ) каждого из компонентов в реакционной камере, соотношением между объемами газов, температурой подложкодержателя и величиной разряда ВЧ-мощности.

Варьирование  $P_{o6}$  газовой смеси в реакционной камере проводилось от 100 до 500 Па при постоянном  $P_{nap}$  шестифтористой серы (SF<sub>6</sub>) 50 Па, при величине подводимой к подложке ВЧ – мощности 500 Вт и температуре подложкодержателя 358 К.

При увеличении  $P_{o6}$  смеси  $SF_6+O_2$  наблюдается сначала увеличение  $V_{\tau p}$   $SiO_2$ , а затем уменьшение до первоначального значения. Очевидно, первоначальное уменьшение  $V_{\tau p}$  связано с уменьшением плотности активных радикалов у поверхности подложки и, как следствие, с уменьшением скорости доставки их к ее поверхности. Выяснение механизма увеличения  $V_{\tau p}$  при дальнейшем повышении  $P_{o6}$  в реакционной камере свидетельствует о том, что при  $P_{o6}$  250-450 Па происходит нормальное падение химически активных радикалов на поверхность  $SiO_2$ , без существенного их рассеяния на боковые стенки реактора. В этом случае вероятность взаимодействия химически активных радикалов с поверхностью  $SiO_2$  увеличивается. Повышение же  $P_{o6}$  газовой смеси выше 450...500 Па, при увеличении скорости потока химически активных частиц к поверхности  $SiO_2$ , увеличивает вероятность их отражения от поверхности. Это усиливает их рассеяние, что приводит к снижению скорости травления.

Необходимо подчеркнуть, что скорость и изотропия травления  $SiO_2$ , в чистом  $SF_6$  при давлении 590 Па гораздо хуже, чем при травлении в смеси  $SF_6 + O_2$  (при общем давлении 100 Па). Это позволяет сделать вывод, что на изотропию процесса и  $V_{\tau p}$  в  $SF_6$  влияет наличие  $O_2$  в зоне реакции.

Именно введение в плазму  $SF_6$  необходимых добавок кислорода и гелия позволяет проводить ИПХТ  $SiO_2$  со скоростью от 60 до 200 нм/мин.

В этих условиях максимальная степень изотропии травления достигает 1.

Эволюция скорости травления по поверхности пластины не так проста. Всегда имеет место различие в скорости травления центра пластины и ее краев, центр пластины всегда травится быстрее. Сближение  $V_{\tau p}$  между краями и цен-

тром пластины достигается при общем давлении 250...450 Па.

Тем не менее, снижение общего давления ниже 350 Па приводит к заметному разбросу по толщине удаляемого слоя при травлении по поверхности пластины. При величине общего давления — 390...450 Па, наблюдается максимальное сближение  $V_{\tiny TD}$  по всей площади пластины.

По всей видимости, изменение колебания в скорости изотопного плазмо-химического травления по площади пластины, во-первых, обусловлено оптимизацией соотношения объемов газов  $\underline{Q}_{(SF6)}/Q_{(O2)}$ , а во-вторых, контактом пластины к столику и ее нагревом.

Искажение профиля от угла  $45^{\circ}$  проявляется как на малых давлениях  $\leq 300$  Па, так и на больших  $\sim 500$  Па значениях общего давления газовой смеси в реакционной камере.

Во всех случаях угол наклона стенок контактного окна менее 70° свидетельствует об удовлетворительном сглаживание его при изотопном плазмохимическом травлении.

Проведенные исследования влияния  $P_{o6}$  газовой смеси  $SF_6 + O_2$  на скорость изотропного плазмохимического травления  $SiO_2$  показали, что резкие колебания значений  $V_{\tau p}$  свидетельствуют о неполном использовании реакционных газов и о нестабильности процесса изотропного плазмохимического травления, очень чувствительного к давлению газовой смеси при прочих равных условиях.

## Результаты испытаний

Многочисленные экспериментальные данные показывают, что  $V_{\text{тр}}$  изотропного плазмохимического травления достигает максимального значения при давлении газовой смеси в пределах 250...450 Па.

Наблюдение за изменениями  $V_{\tau p}$  изотропного плазмохимического травления  $SiO_2$  при постоянном расходе  $O_2$  -3.6 дм<sup>3</sup>/час показывает, что скорость изотропного плазмохимического травления  $SiO_2$  увеличивается во всем исследуемом диапазоне расхода  $SF_6$  от 5 до 50 дм<sup>3</sup>/ч. По сути, в этом случае, изменения  $V_{\tau p}$  коррелирует с увеличением атомов фтора в реакционном пространстве.

Изменение количественного содержания  $SF_6$  от 5 до 50 дм $^3$ /ч приводит к увеличению  $V_{TP}$  практически в 5 раз, т.е. такое изменение происходит от 50 нм/мин до 250 нм/мин при ВЧ - мощности 500 Вт и температуре подложкодержателя 358 К.

Хорошие результаты по воспроизводительности  $V_{TP}$  по всей площади пластины были получены при расходе  $SF_6$  -36...40дм³/ч, при расходе  $O_2$  -3.6 дм³/ч. Расходы  $SF_6$  как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения, по отношению к расходу  $O_2$  -3.6 дм/ч, приводит к заметному разбросу по толщине удаляемого оксида кремния по поверхности пластины.

Важно подчеркнуть, что изотропия травления  $SiO_2$  в чистом  $SF_6$  при  $P_{\text{пар}}$  – 400 Па гораздо хуже, чем при травлении в смеси  $SF_6$  +  $O_2$ . Это позволяет сделать вывод, что на изотропию травления в  $SF_6$  влияют химически активные частицы, рассеянные поверхностью  $SiO_2$ . Для оптимальных условий изотропного плазмохимического травления следует считать расход  $SF_6$  -40...50 дм<sup>3</sup>/ч, где достигается наиболее высокая  $V_{\text{тр}}$ - 200нм/мин и хорошая изотропия процесса.

Снижение скорости изотропного плазмохимического травления  $SiO_2$ , при избыточном расходе кислорода, по-видимому, можно объяснить тем, что избыточный расход его приводит к уменьшению времени нахождения активных частиц в целом в зоне реакции, и, следовательно, к уменьшению их объемной плотности.

При слишком малых расходах кислорода происходит объединение газовой среды активными радикалами в процессе травления, что приводит к снижению скорости процесса.

Интересно отметить влияние расхода кислорода, при прочих равных условиях, на остаточную толщину оксида кремния по поверхности пластины. Полученные результаты свидетельствуют, что как при увеличении, так и при уменьшении расхода кислорода с величины 4-5 дм<sup>3</sup>/ ч происходит увеличение разброса остаточной толщины оксида кремния по площади обрабатываемой пластины.

Поэтому напрашивается вывод, что и в этом случае изменение  $V_{TP}$  изотропного плазмохимического травления  $SiO_2$  не коррелирует с изменением ни атомов фтора, ни атомов кислорода, о чем хорошо свидетельствует зависимость Vтр  $SiO_2$  от соотношения объемов компонента газовой смеси в реакционной камере.

Исходя из этого, следует, что  $V_{TP}$  изотропного плазмохимического травления  $SiO_2$  в газовой смеси  $SF_6 + O_2$ , необходимо проводить при больших концентрациях  $SF_6 \ge 80\%$  и малых концентрациях  $O_2$  10-20% (т.е. отношение расхода  $SF_6$  к  $O_2$ ) должно оставлять 1/5-1/10. Степень изотропии травления при таких условиях достигает максимальной величины. Угол изотропии может быть доведен до  $45^\circ$ . При концентрации  $SF_6$  более 20% по отношению к кислороду, травления  $SiO_2$  всегда изотропно или близко к нему. Однако отклонение от соотношения объемов гексафторида серы и кислорода от 5, в ту или другую сторону, приводят к изменению угла профиля травления контактного окна.

Мощность плазменного разряда определяет эффективность генерации активных частиц, а это, в свою очередь способствует увеличению скорости плазмохимических процессов.

Этот факт подтвердился в результате проведенных исследований. Однозначно установлено, что при увеличении ВЧ-мощности, скорость изотропного плазмохимического травления  $SiO_2$  повышается, при чем на различных расходах  $SF_6$ . Это свидетельствует о более полном плазмохимическом взаимодействии  $SiO_2$  с активными химическими радикалами в объеме реакционной камеры.

Также следует отметить, что величина BЧ – мощности оказывает заметное влияние на клин травления в области низких мощностей BЧ – разряда.

На обратной стороне таких пластин имеется след подтрава и он больше к центру пластины, возможно в этом случае можно говорить о плохом контакте пластины к подложкодержателю.

Увеличение ВЧ – мощности позволяет подавить этот эффект и клин травления для пластин диаметром 100 мм минимизировать. Тем не менее, и в этих случаях скорость травления по центру пластины остается выше, чем по пери-

ферии. По идее, это можно объяснить загрузочным эффектом, который присущ плазменным процессам, проходящим при высоком давлении (>100 Па) газовой смеси в реакционном пространстве [4].

#### Выводы

Увеличение вкладываемой в разряд ВЧ - мощности способствует увеличению скорости травления при одновременном улучшении равномерности стравливания диоксида кремния по всей поверхности пластины диаметром 100 мм и хорошему сглаживанию ступеньки. К аналогичным результатам приводит увеличение температуры подложкодержателя от 298 до 363 К. Это объясняется повышением температуры подложки в результате комбинированного нагрева, как за счет термического воздействия, так и за счет нагрева ее плазмой.

Необходимо отметить, что на пластинах кремния, непланарная сторона которых непокрыта диоксидом кремния или покрыта металлом,  $V_{TP}$  изотропного плазмохимического травления  $SiO_2$  резко увеличивается, по отношению к пластинам, которые покрыты  $SiO_2$  с обеих сторон. Более того, для пластин, нерабочая сторона которых покрыта металлом, этот эффект проявляется в гораздо большей степени.

Это свидетельствует в пользу хорошего прогрева подложки. Однако, при сильном ее перегреве имеет место опасность разрушения фоторезиста, вот почему нагрев подложкодержателя выше температуры 373 К нежелателен.

#### Заключение

На основании проведенных исследований установлена высокая чувствительность скорости изотропного плазмохимического травления диоксида кремния по поверхности пластины составу газовой смеси к общему и парциальному давлению компонентов, к температуре подложки и к типу покрытия непланарной стороны кремниевой подложки. Наиболее приемлемыми компонентами газовой смеси при изотропном травлении является смесь гексафторида серы (Элегаз) с кислородом в соотношении 1/5-1/10.

Максимальная скорость изотропного плазмохимического травления диоксида кремния при равенстве бокового и вертикального травления ( угол сглаживания стенок (≥45°) достигается при величине вкладываемой в разряд ВЧ — мощности — 400…550 Вт, при температуре подложкодержателя -313…363 К и при общем давлении газовой смеси -350…450 Па.

# Библиографический список:

- 1. Кремниевые планарные транзисторы./ Под редакцией Я.А. Федотова. М., «Советское радио», 1973 г.
- 2. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств.М., 1991, С118-122.
- 3. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем –М.: «Высшая школа», 1986, -С.107..