

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ОПЕРАЦИЙ ФОРМИРОВАНИЯ SCREEN-ОКСИДА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЛАСТИН С КРИСТАЛЛАМИ СВЕРХБОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Боброва Мария Владимировна (niiis@niiis.nnov.ru), Шишкина Надежда Сергеевна

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

В настоящей работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований операций блока формирования защитного screen-оксида, формируемого перед ионной имплантацией сильнолегированных областей стока/истока. Разработана последовательность технологических операций и их режимов, позволяющая получить тонкий слой комбинированного оксида, при минимальном температурном воздействии. Полученный слой screen-оксида характеризуется низкой скоростью осаждения, высокой равномерностью по толщине и плотностью.

Ключевые слова: активные области транзистора, быстрый термический отжиг, каналирование, низкотемпературное осаждение, скорость травления, screen-оксид.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF PROCEDURES FOR SCREEN-OXIDE FORMATION WHEN MANUFACTURING WAFERS WITH VERY LARGE-SCALE INTEGRATED MICROCIRCUIT DIES

Bobrova Maria Vladimirovna (niiis@niiis.nnov.ru), Shishkina Nadezhda Sergeevna

Branch of RFNC-VNIIEF «NIIS named after Yu. Ye. Sedakov», Nizhniy Novgorod

The article presents theoretical and experimental research results of forming protective screen-oxide provided before high-doped drain/source implantation. The technological procedure and modes were developed providing obtaining of combined oxide thin layer at minimal thermal effect. The obtained screen-oxide layer is characterized by low rate deposition, high thickness uniformity and density.

Key words: active transistor areas, rapid thermal annealing, channeling, low temperature deposition, etching rate, screen-oxide.

Введение

В технологии изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС) в качестве защитного слоя перед проведением процессов ионной имплантации традиционно используется высокотемпературный оксид кремния (screen-оксид). В связи с тем, что основным недостатком такого способа формирования screen-оксида является длительное температурное воздействие на пластину (что в свою очередь приводит к перераспределению примеси в активных областях сформированных полупроводниковых структур), разработка способа формирования screen-оксида с минимальным температурным воздействием является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является исследование и разработка операций блока формирования screen-оксида толщиной $\approx 160 \text{ \AA}$ (толщина рассчитана

на основе моделирования процесса ионной имплантации), обладающего высокой равномерностью по толщине (коэффициент вариации s не более 2,5 %) и высокой плотностью (значением параметра Wet Etching Rate Ratio, WERR – скорость жидкостного химического травления материала/пленки в растворе плавиковой кислоты (DHF) известной (фиксированной) концентрации относительно высокотемпературного (термического) SiO_2), не более 5, для эффективной защиты поверхности пластины от проникновения ионов металлов, предупреждения эффектов каналирования и распыления поверхности пластины при проведении процесса имплантации сильнолегированных областей стока/истока транзисторов.

Разработка операций блока формирования screen-оксида при минимальном температурном воздействии позволит изготавливать защитный слой для имплантации сильнолегированных областей сто-

ка/истока транзисторов с характеристиками, близкими к высокотемпературному оксиду, и, как следствие, исключит неконтролируемое автолегирование и изменение параметров распределения примесей в активных областях полупроводниковых структур.

Методика эксперимента

В ходе проведения исследований применялись следующие материалы:

- 1) кислород газообразный (O_2) высокой чистоты;
- 2) азот газообразный (N_2) высокой чистоты;
- 3) гелий (He);
- 4) тетраэтоксисилан (TEOS или $(C_2H_5O)_4Si$);
- 5) пластины объемного кремния и пластины КНИ (кремний на изоляторе).

Осаждение слоев проводилось в реакторе химического осаждения из газовой фазы с холодной стенкой и плоскопараллельными электродами.

Быстрый термический отжиг (БТО) проводился в кварцевом реакторе с ламповым нагревом, контроль температуры пластин осуществлялся пирометром в составе оборудования БТО.

Контроль толщины оксида кремния производился с использованием эллипсометра-рефлектометра.

Результаты и обсуждение

В настоящей работе в качестве screen-оксида выбрана комбинация тонкого, полученного в результате быстрого термического отжига оксида кремния (быстрый термический оксид) и уплотненного окси-

да кремния, осаждаемого при низкой температуре из прекурсоров тетраэтоксисилан/озон (TEOS/ O_3). Комбинация слоев screen-оксида выбрана исходя из сравнительного анализа технологических операций формирования тонких слоев оксида кремния (SiO_2) (см. табл. 1). Выбор технологических операций формирования тонких слоев SiO_2 обусловлен их совместимостью с технологией комплектарных «металлоксид-полупроводников (КМОП).

Первый быстрый термический отжиг формирует переходный слой оксида кремния с высоким показателем равномерности по толщине. Основной задачей при формировании первого слоя оксида кремния является восстановление поверхности областей будущих стоков и истоков, поврежденных в результате плазменного воздействия при травлении пристеночного диэлектрика. В связи с тем, что размах толщины объемного кремния после плазменного воздействия составляет, в среднем $\approx 30 \text{ \AA}$, толщину тонкого переходного оксида кремния необходимо выбирать не менее указанной величины.

Основную часть screen-оксида составляет осажденный из прекурсоров TEOS/ O_3 оксид кремния. Его формирование происходит при низкой температуре ($\approx 400 \text{ }^\circ\text{C}$) и исключает перераспределение примеси в слабелегированных областях стока/истока.

Второй быстрый термический отжиг в атмосфере кислорода проводится для уплотнения пористого, осажденного из прекурсоров TEOS/ O_3 , диоксида кремния, с целью приближения физических свойств screen-оксида к высокотемпературному термическому оксиду [1].

Таблица 1

Сравнительный анализ технологических операций формирования тонких слоев оксида кремния (SiO_2)

Технологическая операция формирования SiO_2	Преимущества	Недостатки
Высокотемпературное окисление	Высокая плотность ($WER \approx 30 \text{ \AA/мин}$) и равномерность SiO_2 ($s \leq 2,0\%$)	Длительное время проведения операции ($\sim 3 \text{ ч}$), высокая температура обработки ($\geq 850 \text{ }^\circ\text{C}$)
Быстрый термический отжиг	Быстрое окисление поверхности, тонкие оксиды ($\approx 100 \text{ \AA}$) обладают высокой равномерностью по толщине ($s \leq 1,5\%$)	С увеличением толщины оксида, увеличивается неравномерность окисленного слоя по толщине ($s > 5,0\%$), растет термический бюджет пластины
Низкотемпературное осаждение SiO_2 из прекурсоров TEOS/ O_3	Низкая температура осаждения ($400 \text{ }^\circ\text{C}$), высокая равномерность SiO_2 ($s \leq 1,0\%$), скорость осаждения значительно ниже, чем при плазмоактивируемом осаждении ($\approx 2000 \text{ \AA/мин}$)	Высокая пористость слоя, значительные скорости травления ($WERR$ не менее 15)
Низкотемпературное осаждение плазмоактивируемого SiO_2	Низкая температура осаждения ($400 \text{ }^\circ\text{C}$), плотность SiO_2 выше, а скорость травления ниже, чем при осаждении SiO_2 из прекурсоров TEOS/ O_3 ($WERR \approx 4$)	Высокая скорость осаждения ($\approx 8000 \text{ \AA/мин}$), что приводит к плохой управляемости процессом осаждения тонких слоев SiO_2 , равномерность SiO_2 ниже, чем при осаждении из прекурсоров TEOS/ O_3 ($s \leq 1,5\%$)

Примечание – WER (Wet Etching Rate) – скорость жидкостного химического травления в растворе DHF известной (фиксированной) концентрации

Основной задачей при разработке операций формирования screen-оксида является их интеграция в единый технологический блок, так как режим каждой предыдущей операции оказывает существенное влияние на последующее формирование слоев. Таким образом, невозможно разработать все операции, входящие в блок формирования screen-оксида, отдельно друг от друга.

При разработке операций блока формирования screen-оксида, для технологических операций быстрого термического отжига установлен ряд ограничений по температуре и продолжительности процесса. Так, температура отжига не должна превышать температуру активации примеси в областях стока/истока (1050 °C), причем снижение температуры отжига является предпочтительным, а время поддержания температуры отжига необходимо минимизировать для получения равномерного тонкого окисленного слоя толщиной $\approx 30 \text{ \AA}$.

В случае БТО кремниевых пластин в атмосфере сухого кислорода нижняя граница температур, при которых происходит быстрое термическое окисление кремния составляет $\approx (800 - 950) \text{ }^\circ\text{C}$ [2]. С целью уменьшения времени теплового воздействия на пластину выбрана температура 950 °C. Время отжига варьировалось в диапазоне от 10 до 60 секунд. Допустимый в заданных условиях коэффициент вариации толщины сформированного быстрого термического оксида принимался $\leq 2 \%$. Зависимость толщины слоя быстрого термического оксида от времени первого БТО представлена на рис. 1.

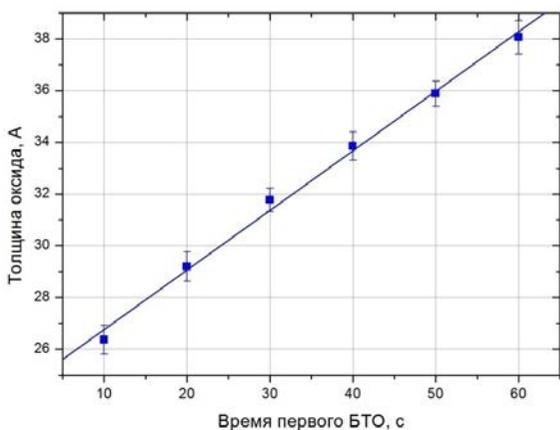


Рис. 1. Зависимость толщины оксида кремния от времени первого БТО (для температуры 950 °C)

В исследуемом временном интервале для температуры 950 °C аппроксимация полученных данных выполнена методом наименьших квадратов. В качестве функции аппроксимации использовалась линейная зависимость вида $y = kx + b$. В результате получена следующая зависимость:

$$y = 0,23x + 24,5, \quad (1)$$

где y – толщина быстрого термического оксида, Å; x – время быстрого термического отжига, с.

Таким образом, согласно данным по равномерности и толщине слоев, полученным после первого

БТО, разработана технологическая операция быстрого термического отжига в атмосфере O_2 длительностью 20 с, позволяющая сформировать оксид кремния $\approx 30 \text{ \AA}$, $s < 2 \%$.

Следующим этапом в формировании screen-оксида является разработка режима низкотемпературного осаждения SiO_2 на подслое быстрого термического оксида. За основу при разработке операции осаждения взят режим низкотемпературного осаждения оксида кремния из прекурсоров TEOS/ O_3 , входящий в состав межуровневого диэлектрика и используемый в технологии изготовления пластин с кристаллами СБИС [3]. Однако в связи с необходимостью формирования тонкого слоя screen-оксида толщиной $\approx 160 \text{ \AA}$, проведена коррекция параметров режима осаждения оксида кремния в атмосфере TEOS/ O_3 для достижения более низкой скорости осаждения.

На начальном этапе разработки получена зависимость результирующей толщины быстрого термического и осажденного слоев SiO_2 от времени первого БТО, представленная на рис. 2.

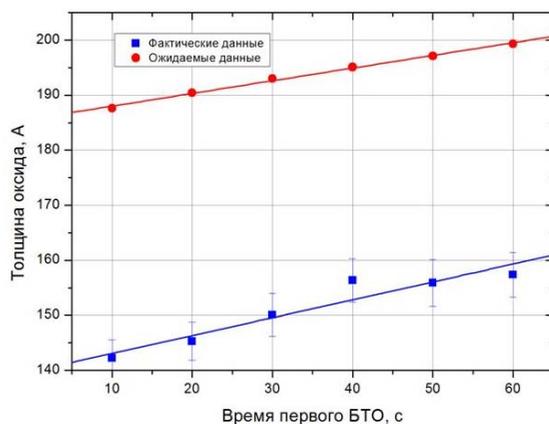


Рис. 2. Зависимость результирующей толщины быстрого термического и осажденного слоев SiO_2 от времени первого БТО

Из рис. 2. видно, что фактически получена меньшая толщина осажденного SiO_2 на окисленной поверхности, чем прогнозировалось исходя из скорости осаждения на неокисленную поверхность кремния. Эти потери обусловлены поверхностной чувствительностью процесса низкотемпературного осаждения оксида кремния к подслою (быстрому термическому оксиду). Определено, что скорость осаждения на быстрый термический оксид в $\approx 1,4$ раза меньше, чем на поверхность объемного кремния. Это необходимо учитывать при дальнейших разработках режимов осаждения SiO_2 .

Таким образом, на следующем этапе разработки проведены исследования явления поверхностной чувствительности процесса осаждения SiO_2 из прекурсоров TEOS/ O_3 . Под поверхностной чувствительностью следует понимать изменение скорости осаждения оксида кремния, формируемого из прекурсоров TEOS/ O_3 , на различные поверхности [4 – 6].

Основные параметры режимов с различными скоростями осаждения: режима, разработанного для

формирования межуровневого диэлектрика, и режима, разработанного для формирования screen-оксида приведены ниже (см. табл. 2).

Режим № 2 характеризуется меньшими скоростями осаждения, чем режим № 1, что связано с замедлением скорости реакции из-за недостатка кремнийсодержащего реагента (TEOS).

Расчитаны коэффициенты κ_1 и κ_2 , характеризующие поверхностную чувствительность для режимов осаждения № 1 и 2 соответственно:

$$\kappa_1 = \frac{V_a}{V_b} = 0,9, \quad (2)$$

$$\kappa_2 = \frac{V_c}{V_d} = 0,7, \quad (3)$$

где V_a – скорость осаждения диоксида кремния на окисленную в результате БТО поверхность в режиме № 1; V_b – скорость осаждения диоксида кремния на объемный кремний в режиме № 1; V_c – скорость осаждения диоксида кремния на окисленную в результате БТО поверхность в режиме № 2; V_d – скорость осаждения диоксида кремния на объемный кремний в режиме № 2.

Таким образом, полученные значения констант для режимов осаждения № 1 и 2 значительно отличаются ($\kappa_1 > \kappa_2$), то дает основание полагать, что снижение расхода кремнийсодержащего реагента в процессе осаждения оказывает существенное влияние на поверхностную чувствительность оксида кремния к материалу подслоя.

В связи с тем, что истинная причина поверхностной чувствительности в настоящее время не установлена [5], результаты, полученные в рамках настоящей работы, будут использованы для дальнейших исследований механизмов осаждения слоев оксида кремния из прекурсоров TEOS/O₃ на различные поверхности.

Следующим этапом является определение результирующей толщины screen-оксида после уплотнения БТО в атмосфере кислорода. Время первого БТО для каждого образца совпадает со временем уплотнения (время второго БТО). Зависимость результирующей толщины screen-оксида от времени первого и второго БТО представлена на рис. 3.

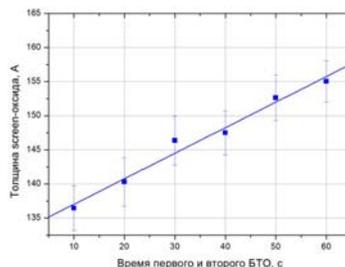


Рис. 3. Зависимость результирующей толщины screen-оксида от времени первого и второго БТО

Уплотнение screen-оксида в результате проведения второго БТО для каждого времени отжига рассчитано следующим образом:

$$\delta = \frac{D_{\text{БТО+S}} - D_{\text{result}}}{D_{\text{БТО+S}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где δ – величина уплотнения screen-оксида, %; $D_{\text{БТО+S}}$ – суммарная толщина термического (после первого БТО) и осажденного оксидов, Å; D_{result} – результирующая толщина screen-оксида, Å.

Зависимость величины уплотнения screen-оксида от времени второго БТО представлена на рис. 4.

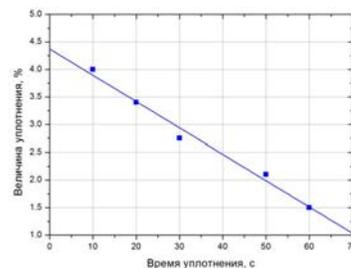


Рис. 4. Зависимость величины уплотнения screen-оксида от времени второго БТО

Полученные экспериментальные данные демонстрируют уменьшение величины уплотнения с увеличением длительности отжига. Вероятно, это связано с протеканием двух конкурирующих процессов при БТО: уплотнение низкотемпературного SiO₂ и одновременное окисление. В рамках данной работы определены скорости протекания этих двух конкурирующих процессов и их процентное соотношение для длительности отжига 20 с (см. табл. 3).

Таблица 2

Основные параметры режимов с различными скоростями осаждения оксида кремния из прекурсоров TEOS/O₃

Режим	Параметры операции (общие для процессов осаждения)	Параметры операции (варьируемые параметры для замедления скорости осаждения)	Скорость осаждения на объемный кремний, Å/мин	Скорость осаждения на окисленную поверхность, Å/мин
Режим № 1	Давление 8000 Па, температура подложкодержателя 400 °С, расход озона 5000 мл/мин, расход гелия 1200 мл/мин	Межэлектродное расстояние 6,35 мм, расход тетраэтоксисилана 475 мг/мин	≈2000	≈1800
Режим № 2		Межэлектродное расстояние 11,43 мм, расход тетраэтоксисилана 200 мг/мин	≈1100	≈800

Таблица 3

Сравнительный анализ соотношения окисления и уплотнения в процессе быстрого термического отжига (20 с) screen-оксида

Режим БТО	Скорость процесса, Å/с	Вклад процесса в уплотнение screen-оксида, %
Окисление (отжиг в атмосфере O ₂)	≈0,6	≈40
Уплотнение (отжиг в атмосфере N ₂)	≈1,0	≈60

При дальнейшем увеличении времени БТО уплотнение прекращается и окисление поверхности кремния вносит больший вклад в результирующую толщину screen-оксида.

Таким образом, согласно полученным данным об уплотнении, результирующая толщина screen-оксида рассчитывается по формуле:

$$D_{result} = D_{БТО} + D_S - \Delta - D_{упл}, \quad (5)$$

где $D_{БТО}$ – толщина быстрого термического оксида, Å; D_S – толщина SiO₂, осаждаемого на поверхность объемного кремния, Å; Δ – разница между фактическими и ожидаемыми значениями толщины осажденного SiO₂, Å; $D_{упл}$ – толщина уплотнения screen-оксида, Å.

В маршруте изготовления пластин с кристаллами СБИС результирующая толщина screen-оксида должна составлять ≈160 Å, при этом время первого и второго БТО, определенное экспериментальным путем составляет 20 с. Таким образом, согласно формуле (5), толщина SiO₂, осаждаемого на поверхность объемного кремния, необходимая для получения результирующей толщины screen-оксида, равной ≈160 Å, составляет ≈180 Å.

Данные расчетов подтверждены экспериментально – разработан блок операций «БТО – осаждение SiO₂ – БТО». Результирующая толщина screen-оксида составляет ≈160 Å.

Также в ходе работы была исследована относительная скорость жидкостного химического травления screen-оксида. Установлено, что средняя скорость травления, сформированного жертвенного SiO₂ составляет ≈147 Å/мин, скорость травления высокотемпературного термического оксида ≈30 Å/мин. Таким образом, WERR составляет ≈4,9, что удовлетворяет требованиям к разработке операций блока формирования screen-оксида.

Заключение

В результате выполнения настоящей работы разработана последовательность операций блока формирования screen-оксида толщиной ≈160Å, используемого при имплантации областей стока/истока транзисторов в маршруте изготовления пластин с кристаллами СБИС.

Параметры процесса осаждения тонких пленок screen-оксида оптимизированы с учетом результатов по разработке процессов быстрого термического окисления и низкотемпературного осаждения диоксида кремния, анализа методов уменьшения скорости осаждения слоев диоксида кремния из прекурсоров TEOS/O₃. Screen-оксид, осажженный при оптимизированных параметрах, характеризуется низкой скоростью осаждения основного материала – низкотемпературного диоксида кремния, ≈ 800 Å/мин, приемлемой равномерностью по толщине (коэффициент вариации ≈2,5 %) и высокой плотностью (WERR≈4,9).

Кроме того, при разработке низкотемпературного осаждения диоксида кремния из прекурсоров TEOS/O₃, исследовано малоизученное в мировой практике явление поверхностной чувствительности процессов осаждения к материалу подслоя. Получены данные о значительном влиянии недостатка кремнийсодержащего реагента (TEOS) в газовой смеси на поверхностную чувствительность слоя, осаждаемого из прекурсоров TEOS/O₃, к материалу подложки.

Разработанная в настоящей работе последовательность операций внедрена в маршрут изготовления пластин с кристаллами СБИС, что позволило получить необходимые электрофизические характеристики тестовых структур контроля параметров рабочих пластин.

Кроме того, в дальнейшем проведенные в работе исследования будут использованы при изучении явления поверхностной чувствительности слоев оксида кремния, осаждаемых из прекурсоров TEOS/O₃, а также при необходимости разработки новых режимов операций формирования тонких защитных слоев.

Список литературы

1. Светличный А. М., Агеев О. А., Шляховой Д. А. Особенности получения тонких пленок SiO₂ методом быстрой термической обработки // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2001. № 4. 5.
2. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности изготовления субмикронных МОП-транзисторов. Ч. 1. М.: Техносфера, 2002.
3. Козлова Н. С., Шишкин А. О. Разработка и оптимизация параметров технологического процесса плазмоактивируемого осаждения тонких пленок легированного диоксида кремния / 12-ая научно-техническая конференция «Молодежь в науке» // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014.
4. Киреев В. Ю. Столяров А. А. Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. М.: Техносфера, 2006.
5. Пат. 6753279 США, МКИ7 H01L 21/31. Process For Depositing a Porous, Low Dielectric Constant Silicon Oxide Film / F. Geiger, F. Gaillard. – № 09/632425; заявлено 04.08.2000; опубл. 22.06.2004.
6. Kwok et al. Integrated PECVD / Ozone-TEOS SACVD Processes for sub-half micron gap fill: electrostatic effects // J. Electrochem. Soc. 1994. Vol. 141, N 8.