

Межкомпонентная изоляция канавками, заполненными диэлектриком, для субмикронных ИМС

О. Наливайко¹, А. Турцевич, д. т. н.², В. Плебанович, к. т. н.³,
В. Роговой⁴

УДК 621.315.592 | ВАК 05.27.06

Рассмотрены особенности и проблемы процесса формирования межкомпонентной изоляции ИМС с использованием мелких канавок, заполненных диэлектриком. Предложен процесс создания межкомпонентной изоляции, который позволяет снизить высоту рельефа структуры до менее 0,1 мкм и уменьшить ширину области изоляции до 0,5 мкм.

ИМС, создаваемые по МОП-технологии, имеют очень высокую плотность упаковки, а использование металлических проводников для формирования межкомпонентных соединений приводит к формированию паразитных связей. Для исключения образования паразитных каналов необходимо, чтобы пороговое напряжение паразитного транзистора было на 3–4 В выше рабочего напряжения МОП-транзистора [1]. Для создания таких условий необходимо использовать толстый локальный полевой оксид кремния для изоляции соседних МОП-приборов. Так как толстый оксид кремния в дальнейшем создает проблемы с конформностью заполнения топологического рельефа, для уменьшения толщины полевого оксида кремния используется увеличение дозы легирующей примеси под полевым оксидом кремния. Такой способ формирования межкомпонентной изоляции известен как LOCOS – локальное окисление кремниевой подложки через маску $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с предварительным под-

легированием области под ним (рис. 1а). Это достаточно простой способ формирования межкомпонентной изоляции, однако он имеет существенный недостаток – боковое распространение изолирующего оксида кремния («птичий клюв»). Этот недостаток ограничивает возможности масштабирования. Для уменьшения «птичьего клюва» метод был модернизирован за счет введения промежуточного (между SiO_2 и Si_3N_4) слоя поликристаллического кремния (Polysilicon Buffered LOCOS – PBL) (рис. 1б) [1]. Слой кремния между оксидом и нитридом кремния помогает частично ослабить механические напряжения, что способствует уменьшению величины «птичьего клюва». Недостатками являются увеличение сложности процесса, трудности травления трехслойной структуры (неровность края), меньшая заглубленность полевого оксида кремния и его утонение. Тем не менее, такой способ формирования межкомпонентной изоляции может использоваться вплоть до проектных норм 0,35 мкм.

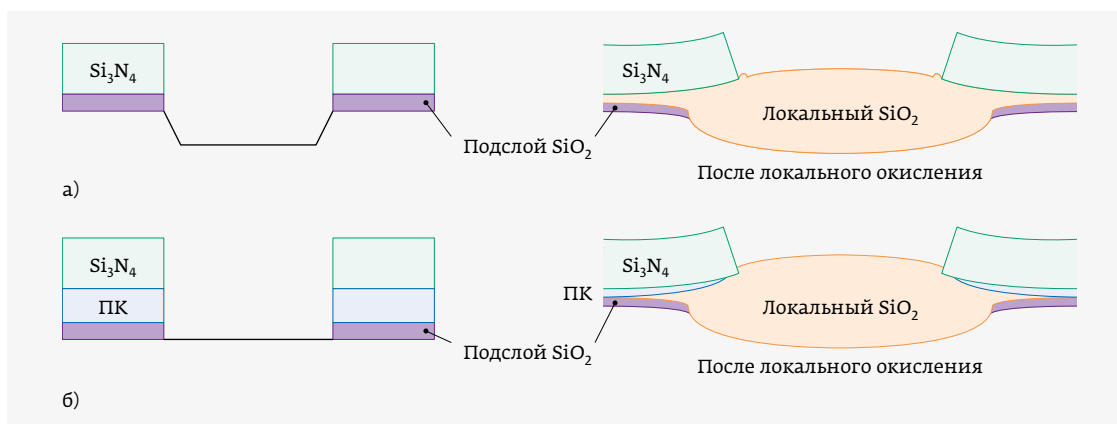


Рис. 1. Формирование межкомпонентной изоляции локальным окислением кремния: а – полностью заглубленный LOCOS; б – LOCOS с промежуточным поликремниевым слоем

¹ ОАО «ИНТЕГРАЛ», заместитель главного технолога.

² Начальник управления Министерства промышленности Республики Беларусь.

³ ОАО «Планар», заместитель генерального директора по маркетингу.

⁴ ОАО «ИНТЕГРАЛ», начальник отдела управления главного технолога.

Дальнейшее уменьшение минимальных топологических размеров элементов СБИС привело к необходимости использования новых методов создания межкомпонентной изоляции. Это связано с тем, что возможности миниатюризации при использовании стандартной и модернизированной LOCOS-технологии изоляции исчерпываются из-за наличия достаточно протяженных участков «птичьего клюва» (до 0,25 мкм) в мезаобластях вблизи краев жесткой маски из пленки нитрида кремния. Кроме того, методы локального окисления не позволяют обеспечить глобальную планарность кремниевых структур, которая необходима для реализации субмикронной литографии вследствие ограниченности фокусного расстояния установок проекционного совмещения и экспонирования. Применение методов безмасочной литографии позволяет улучшить фокусировку на развитой поверхности полупроводниковой пластины, за счет динамической системы автофокусировки и уменьшения площади экспонирования, но полностью решить проблему невозможно [2, 3]. При производстве изделий с проектными нормами 0,35 мкм и ниже на смену LOCOS-технологии пришла технология изоляции мелкими канавками, заполненными оксидом кремния (Shallow Trench Isolation – STI) (рис. 2) [4], которая позволяет исключить «птичий клюв», повысить планарность кремниевых структур и, в конечном итоге, повысить степень интеграции.

Канавка на границе раздела между карманами n- и p-типа предотвращает взаимную диффузию легирующих примесей в местах, где два кармана примыкают друг к другу. Таким образом, исключается необходимость компенсации легирующих примесей (которая уменьшает поверхностную концентрацию примеси на границе кармана). Это позволяет использовать более высокие значения паразитных пороговых напряжений при меньших изолирующих пространствах.

В настоящей работе исследовался процесс формирования межкомпонентной изоляции канавками, заполненными диэлектриком, для микросхем с проектными нормами 0,35 мкм и ниже.

Типичная последовательность формирования STI-изоляции представлена на рис. 3.

Процесс формирования STI-изоляции является достаточно сложным, имеется ряд проблем, которые необходимо решать в зависимости от имеющегося технологического оборудования:

- во-первых, проблемы, связанные с травлением канавок. В базовой структуре с изоляцией

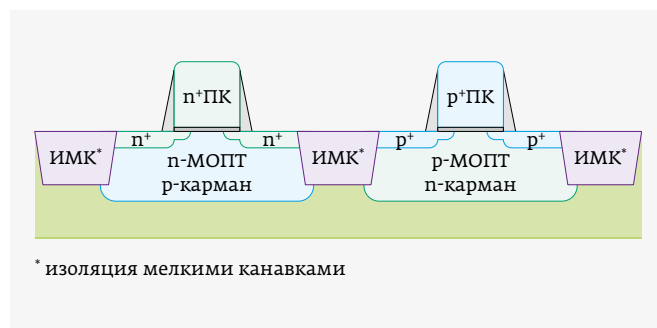


Рис. 2. Формирование межкомпонентной изоляции мелкими канавками, заполненными оксидом кремния

узкими канавками боковые стенки канавки обычно имеют наклон в диапазоне 70–85°. По мере уменьшения ширины канавок этот наклон должен становиться все более крутым (до 88° для некоторых применений). Достижение такого профиля возможно при использовании современного оборудования для плазмохимического травления;

- во-вторых, стойкость оксида кремния к процессам влажного химического травления [5]. Химическое травление SiO₂ происходит не только на поверхности, но и в месте стыка слоев оксида кремния, где может образовываться щель (желоб по периметру области STI-изоляции – рис. 4) из-за различия в скоростях химического травления термического выращенного SiO₂ и пленок SiO₂, осажденных из газовой фазы. Для выравнивания скоростей травления требуется использовать уплотнение осажденных из газовой фазы пленок SiO₂, обеспечить отсутствие растрескивания, а также подобрать приемлемые химические травители;

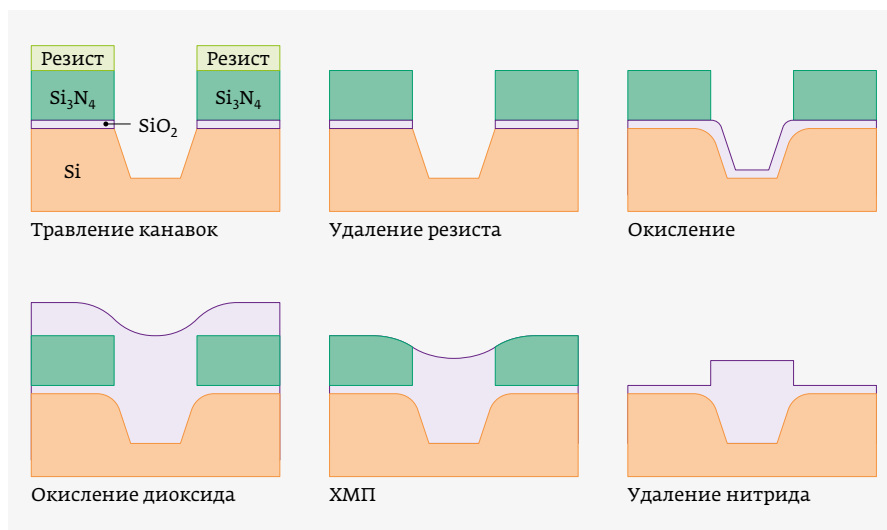


Рис. 3. Основные этапы формирования STI-изоляции

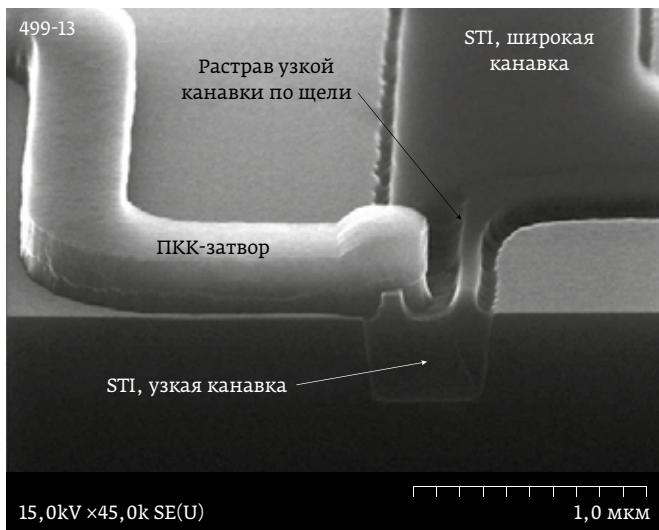


Рис. 4. РЭМ-фотография структуры с «растравом» узкой канавки по щели при проведении химической обработки

- в-третьих, чувствительность подпороговых характеристик MOSFET-транзисторов к форме верхних углов канавки [6]. Края кремниевой мезаструктуры на верхних углах канавки являются частью структуры затвора, который перекрывает эти области. Этот краевой эффект становится сильнее, если область изоляции под затвором частично эродирована (разрушена). Кроме того, на углах канавки происходит утонение подзатворного диэлектрика. Оптимальным при использовании STI-изоляции является случай, когда затвор лежит на гладкой поверхности. Однако на практике это не достигается, поэтому

необходимо обрабатывать технологии «округления» угла канавки в структурах с изоляцией канавками, заполненными диэлектриком.

В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния КДБ-12 ориентации (100) диаметром 200 мм. На пластинах проводилось окисление на толщину 20 нм в вертикальной диффузионной печи Арогее, затем на подложки при пониженном давлении из газовой фазы осаждали слой Si_3N_4 толщиной 0,15 мкм в вертикальном ХОГФ-реакторе пониженного давления Арогее. С использованием безмасочной фотолитографии на генераторе изображений DUV ЭМ-5489Б ОАО «Планар» (г. Минск) [7] формировался микрорисунок и проводилось плазмохимическое травление канавок в кремнии на установке ТСП-9400. Плазмохимическое травление нитрида кремния и оксида кремния проводилось на установке Rainbow-4520XL.

В качестве материала для заполнения канавки были опробованы пленки оксида кремния толщиной 0,9 мкм, полученные пиролитическим разложением тетраэтоксисилана (ТЭОС) при средней температуре (СТО) в вертикальном реакторе пониженного давления Арогее, а также пленки SiO_2 толщиной 0,6 мкм, полученные плазмохимическим осаждением с использованием ТЭОС (ПХО ТЭОС), и пленки SiO_2 толщиной 0,6 мкм, осажденные при субатмосферном давлении (СА ХОГФ) на установке Precision-5000CVD. На части пластин после осаждения пленок оксида кремния был проведен уплотняющий отжиг 800 °С в среде H_2/O_2 , затем 900 °С в среде N_2 [5]. Химико-механическая полировка (ХМП) оксида кремния проводилась на установке Auriga ЕС с использованием суспензии Klebosol 30N50S. Для сглаживания рельефа после ХМП проводилось окисление (режим: 1000 °С, сухой O_2 , 50 нм)

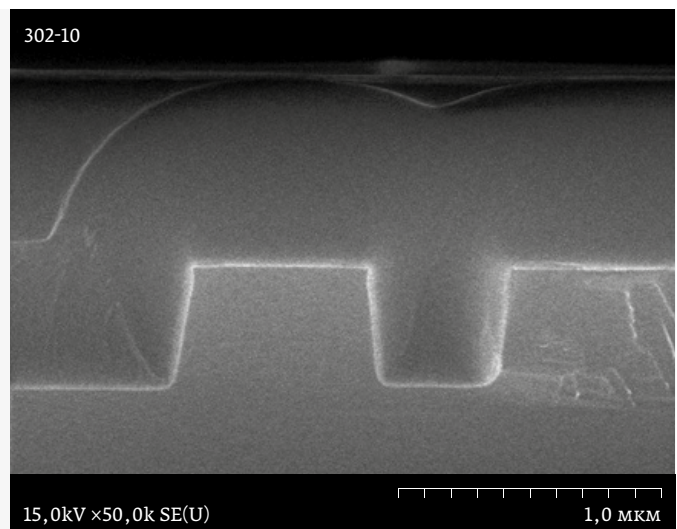
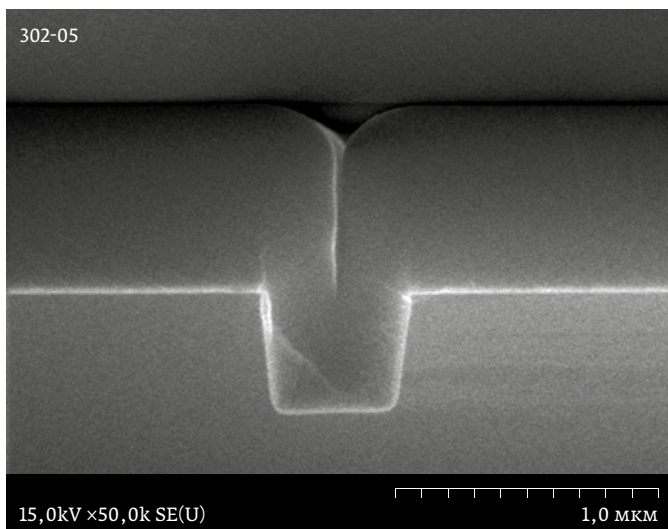


Рис. 5. РЭМ-фотографии структуры после заполнения канавки пленками оксида кремния: а – ПХО ТЭОС 0,6 мкм; б – СА ХОГФ SiO_2 0,6 мкм

с последующим травлением SiO₂ в HF: H₂O=1:10. Снятие Si₃N₄ проводилось на установке DNS WS820C в ортофосфорной кислоте при T=160 ± 5 °C в течение 40 мин. Снятие поднитридного SiO₂ проводилось в аэрозольно распыленном растворе HF: H₂O=1:50 в течение 280 с на установке Mercury MP.

Определение скорости травления отожженного изолирующего оксида кремния V_{тр} проводилось путем химического травления оксида кремния в растворе HF: H₂O=1:10 в ванне установки DNS WS-820C. Толщина оксида кремния (СТО, ПХО ТЭОС или СА ХОГФ) контролировалась методом спектральной эллипсометрии на установке ЭМ-6022 производства ОАО «Планар» (г. Минск) [8]. Общий вид сверху и поперечное сечение профиля структуры контролировались при помощи растровой электронной микроскопии на установке Hitachi SEM-4800.

На рис. 5 приведены фотографии структур после осаждения SiO₂. Видно, что при использовании пленок ПХО ТЭОС в узких канавках образуется щель, которая растравливается при последующих операциях химического травления. При использовании пленок СТО после осаждения в узких канавках щель отсутствует, однако, при проведении химического травления СТО щель образуется. Пленки СА ХОГФ SiO₂ в канавках осаждаются без образования щели и при дальнейших операциях химического травления не растравливаются.

Скорость травления неуплотненного СА ХОГФ SiO₂ в HF: H₂O=1:10 составляет 90–100 нм / мин и в 3,6–4,0 раза превышает скорость травления термического SiO₂ (25 нм / мин) [9]. С целью выравнивания скоростей травления было проведено исследование влияния температуры и длительности отжига в сухом O₂ на скорость травления СА ХОГФ SiO₂ (рис. 6). Видно, что с увеличением температуры отжига скорость травления субатмосферного оксида кремния уменьшается и при 950 °C составляет 40–52 нм / мин, а при 1050 °C – 32–35 нм / мин, что в 1,28–1,4 раза выше, чем скорость травления термического SiO₂ и позволяет проводить удаление слоев оксида кремния с поверхности без увеличения высоты топологического рельефа, так как при 2-минутной длительности перетрава уход толщины не превышает 10–20 нм.

Основные требования, предъявляемые к ХМП канавочной изоляции [4, 10]:

- осажденный окисел над маской нитрида должен быть удален;
- не допускается снятие нитрида при ХМП и повреждение кремния в активных областях;
- для лучших характеристик приборов и повышения съема

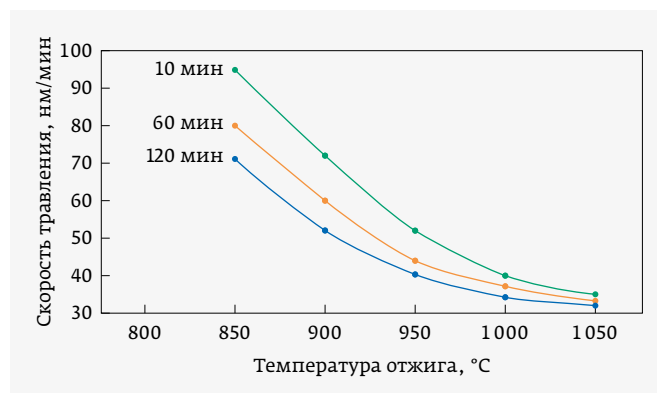


Рис. 6. Зависимости скорости травления СА ХОГФ SiO₂ от температуры отжига при различной длительности отжига

поверхность оставшегося в канавке диэлектрика должна быть выше поверхности кремния. Крайне нежелательно расположение поверхности диэлектрика в канавке ниже поверхности кремния в активных областях, так как это приводит к повышению допороговых утечек транзисторов;

- должна обеспечиваться планарность поверхности пластины.

Определены оптимальные условия процесса полировки на установке Auriga EC, обеспечивающие приемлемую скорость полировки, селективность по отношению к SiO₂ и отсутствие вибрации:

- скорость вращения полировального стола: 8–10 об / мин;
- усилие прижима носителей: 90,7–102,1 кг.

Локальная скорость ХМП оксида кремния обратно пропорциональна плотности заполнения. При этом в структуре возникают недополированные (область А) и переполитрованные области (область Б) (рис. 7). Экспериментально установлено, что разница в толщине окисла в канавке в областях А и Б после проведения ХМП с использованием стандартной суспензии Klebosol 30N50S не превышает 50 нм.

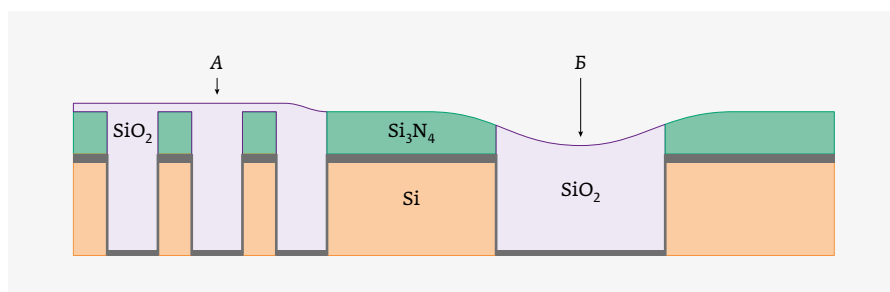


Рис. 7. Вид структуры после химико-механической полировки диэлектрика: А - недополированная область; Б - переполитрованная область

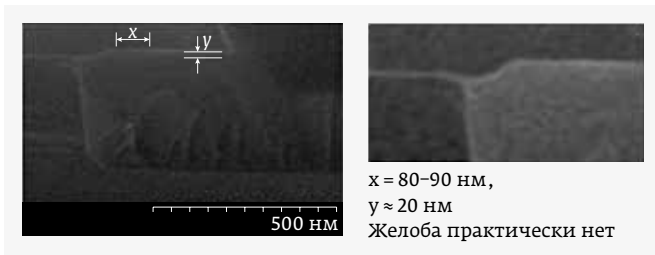


Рис. 8. РЭМ-фотографии профиля STI-изоляции и «округление» верхней кромки канавки по варианту «двойное окисление с подтравливанием Si₃N₄»

Для «округления» углов верхней кромки канавки опробовались следующие варианты:

- ПХТ Si в канавке с маской Si₃N₄ и подтравленным в течение 60 с в буферном травителе поднитридным SiO₂;
- окисление Si в канавке на $d=20$ нм при 1000 °С (одинарное окисление);
- подтрав поднитридного SiO₂ под Si₃N₄ на 12 нм и окисление Si в канавке на $d=20$ нм при повышенной температуре 1050 °С;
- окисление Si в канавке на $d=20$ нм с последующим стравливанием SiO₂ и повторным окислением 20 нм (двойное окисление) [6];
- окисление Si в канавке на $d=20$ нм, освежение 15 с в HF 1:10 и химическое подтравливание Si₃N₄ на толщину 50 нм с последующим стравливанием

SiO₂ и повторным окислением 20 нм (двойное окисление с подтравливанием Si₃N₄);

- окисление Si в канавке на $d=50$ нм при 1000 °С.

Наилучший вариант профиля STI-изоляции и «округления» верхней кромки канавки был получен при окислении кремния на 20 нм, освежении 15 с в HF: H₂O=1:10 и химическом подтравливании Si₃N₄ на 50 нм с последующим стравливанием SiO₂ и повторным окислением 20 нм (рис. 8) [9]. Хорошее «округление» верхней кромки канавки дает двойное окисление – окисление кремния на 20 нм с последующим стравливанием SiO₂ и повторным окислением 20 нм. Окисление кремния на 50 нм при 1000 °С дает хорошее «округление», но при этом приводит к большому уходу размеров активной области.

Опробование предложенного способа формирования межкомпонентной изоляции с использованием двойного окисления для «округления» углов верхней кромки канавки и пленок СА ХОГФ SiO₂, уплотненных при температуре 1050 °С после проведения химико-механической полировки [11], было проведено на изделии СОЗУ 1 Мбит (3,3 В) по 0,35 мкм КМОП-процессу. РЭМ-фотографии структуры с изоляцией LOCOS с промежуточным поликремниевым слоем и с STI-изоляцией представлены на рис. 9. Видно, что при формировании STI-изоляции обеспечивается получение структуры с планарным рельефом без образования желоба по периметру области STI-изоляции. По сравнению с изоляцией LOCOS с промежуточным поликремниевым слоем

высота рельефа структуры уменьшается от 0,25 до 0,02–0,05 мкм (т.е. на 0,20–0,23 мкм), ширина изоляции – от 0,75 до 0,5 мкм, что позволяет повысить плотность упаковки и, соответственно, степень интеграции. Приборы СОЗУ 1 Мбит (3,3 В), изготовленные с использованием STI-изоляции, выдержали краткосрочные и долгосрочные испытания на надежность.

Таким образом, использование пленок СА ХОГФ SiO₂ с отжигом при температуре 1050 °С после проведения химико-механической полировки позволяет создавать межкомпонентную изоляцию для ИМС с проектными нормами 0,25–0,35 мкм. Использование пленок СА ХОГФ SiO₂ для ИМС с меньшими проектными нормами возможно при улучшении заполнения канавок за счет усовершенствования режимов осаждения пленок оксида кремния при субатмосферном давлении.

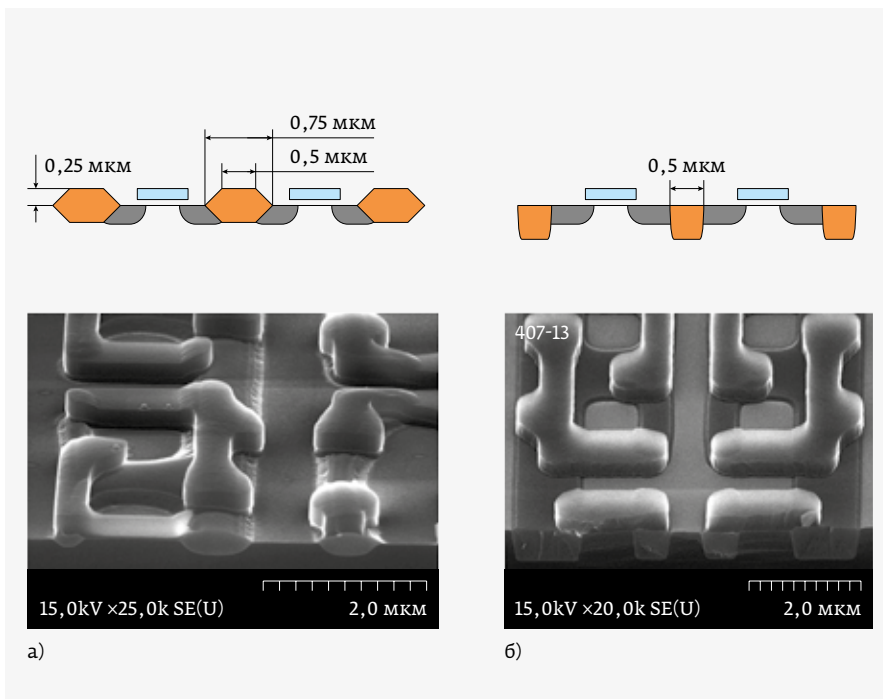


Рис. 9. РЭМ-фотографии структуры после ПХТ затвора: а – с LOCOS-изоляцией с промежуточным поликремниевым слоем; б – с STI-изоляцией



ПРОЕКТИРОВАНИЕ



ГЕНЕРАЦИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ



КОНТРОЛЬ
ФОТОШАБЛОНОВ



РЕМОНТ
ФОТОШАБЛОНОВ



ФОТОЛИТОГРАФИЯ



КОНТРОЛЬ
ПЛАСТИН



СБОРКА ИЗДЕЛИЙ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

ГЕНЕРАТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Диапазон UV, DUV
- Проектная норма 90, 130 нм
- 16/32-лучевая архитектура
- Фазосдвигающие шаблоны
- Быстрая переналадка пластина – шаблон



КОНТРОЛЬ ФОТОШАБЛОНОВ

- Проектная норма 90, 130, 250 нм
- Твердотельный лазер
- Контроль методом D2DB, D2D
- Высокая производительность
- Контроль неплоскостности



РЕМОНТ ФОТОШАБЛОНОВ

- Фемтосекундный лазер
- 0.15/ 0.3/ 0.5 μm min элемент
- Размер шаблона до 9"x9"
- Ремонт копированием
- Ремонт через пелликл
- Прозрачные / непрозрачные дефекты



БЕЗМАСОЧНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Многоканальные лазерные генераторы изображений
- Проектная норма 0.35, 0.6 μm
- Высокая точность совмещения
- $\varnothing 200, 150, 100$ мм



СТЕППЕРЫ

- Проектная норма 0.35, 0.8 μm
- Автоматический масштаб
- Двустороннее совмещение
- $\varnothing 200, 150, 100$ мм
- Твердотельный источник света



КОНТАКТНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Ручная и автоматизированная загрузка
- Двусторонняя литография
- Высокая точность совмещения
- Низкий уровень генерации дефектов
- Высокая энергоэффективность



КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ

- Контроль привносимых дефектов пластин без топологии
- Автоматический микро и макро контроль дефектов пластин с топологией
- Высокая производительность



АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ

- Контроль микроразмеров
- Контроль неплоскостности
- Контроль координат
- Контроль толщин
- Контроль рассовмещения



ЗОНДОВЫЙ КОНТРОЛЬ

- $\varnothing 200, 150, 100$ мм
- ± 4 мкм погрешность контактирования
- Ручное / полуавтоматическое / автоматическое оборудование



РАЗДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИН И ПОДЛОЖЕК

- $\varnothing 300, 200, 150, 100$ мм
- 2 независимые зоны разделения в одной установке
- 2.4 кВт мощность электрошпинделя
- Полуавтоматическое / автоматическое оборудование



МОНТАЖ КРИСТАЛЛОВ И ВЫВОДОВ МИКРОСХЕМ

- Термозвуковая сварка
- Ультразвуковая сварка
- Контактная сварка



Создаем традиции будущего!

- Единое таможенное пространство
- 59 лет опыта в разработке и производстве прецизионного оптико-механического и сборочного оборудования
- Высокий уровень применяемых технологий и современного оборудования
- Полный цикл разработки и производства, высококвалифицированный персонал
- Высокое качество изделий подтверждено национальными и международными стандартами

220033, Республика Беларусь, г. Минск, Партизанский пр-т 2, корп. 2-31;
факс.: +375 17 226-12-05; тел.: +375 17 297-37-09; www.planar.by, office@kbtem-omo.by

ОТДЕЛ МАРКЕТИНГА
(Оптико-механическое оборудование)
тел.: (+375 17) 223-71-28, kbtem.omo@gmail.com

ОТДЕЛ МАРКЕТИНГА
(Оборудование подготовки кристаллов к сборке)
тел.: (+375 17) 223-22-26, planar_ovep@kbtem.by



ЛИТЕРАТУРА

1. Silicon Processing for the VLSI Era: V. 2: Process Integration / by Stanley Wolf // Sunset Beach: Lattice Press. 1990. PP. 17–38.
2. **Плебанович В. И.** Безмасковая литография – требование сегодняшнего дня // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2015. № 7 (00147). С. 112–118.
3. **Аваков С. М., Плебанович В. И., Лапко А. В.** Генераторы изображений для безмасковой литографии // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 9 (00190). С. 80–84.
4. Silicon Processing for the VLSI Era: V. 4: Deep-Submicron Process Technology / by Stanley Wolf // Sunset Beach: Lattice Press. 2002. PP. 433–474.
5. **Оне К., Оданак С., Мориёма К., Хори Т., Фусе Г.** Narrow-Width Effects of Shallow-Trench-Isolated CMOS with n+Poly-Si Gate // IEEE Trans. Electron Dev. ED-36. June 1989. PP. 1110–1116.
6. **Kim M. S., Roh Y., Park C. S.** Reduction of oxide leakage currents of EEPROM at STI corners using sacrificial oxide/liner SiN / LPCVD MTO. / M. S. Kim et al. // Surface & Coatings Technology. 2008. V. 202. No.22–23. PP. 5697–5700.
7. <http://kb-omo.by/content/view/781/490/>
8. <http://kb-omo.by/content/view/1037/562/>
9. **Наливайко О. Ю., Роговой В. И., Турцевич А. С., Кисель А. М.** Формирование межкомпонентной изоляции канавками, заполненными диэлектриком // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф., Минск, 12–13 окт. 2016 г. / Редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. Минск: БГУ. 2016. С. 102–105.
10. **Srinivasan R., Dandu P.VR., Babu S.V.** Shallow trench isolation chemical mechanical planarization: A review // ECS Journal of Solid State Science and Technology. 2015. V. 4. No. 11. PP. 5029–5039.
11. Способ формирования межкомпонентной изоляции элементов интегральных микросхем на кремниевой подложке: патент. 19582 Республики Беларусь: МПК H 01L 21/205, C23C 16/30 / МПК H01L 21/76 / опубл. 30.10.15.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 840 руб.

ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНАЯ НАНОСТРУКТУРНАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

Жигачев А. О., Головин Ю. И., Умрихин А. В., Коренков В. В., Тюрин А. И., Родаев В. В., Дьячек Т. А., Фарбер Б. Я.

Под общей редакцией Ю. И. Головина

2-е изд., доп. и испр.

Книга написана коллективом авторов, имеющих опыт в области создания, исследования и реализации материалов и изделий на основе как химически чистого диоксида циркония, так и природного бадделеита с примесями.

Книга будет интересна широкому кругу читателей: от студентов естественно-научных специальностей до инженеров, технологов и медицинских работников, связанных с практическим применением циркониевой керамики.

Разработка методов синтеза, получение и подготовка оригинальных керамических образцов на основе бадделеита выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10405). Отработка методик исследования и определение физико-механических характеристик осуществлены при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 16.2100.2017 / ПЧ).

Разработка и реализация новых подходов и методов термографической диагностики и контроля осуществлены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00602).

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2020. – 370 с.,
ISBN 978-5-94836-607-4

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru



САМОЕ ПОСЕЩАЕМОЕ ОТРАСЛЕВОЕ
МЕРОПРИЯТИЕ СЕВЕРО-ЗАПАДА
РОССИИ!*

XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
& ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

21-23
СЕНТЯБРЯ
2022
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ



**НАПОЛНЯЙТЕ КЛИЕНТСКУЮ БАЗУ
– ОСНОВУ ВАШЕЙ ЭКОСИСТЕМЫ!**



*Выставку 2021 года посетили более 7 700 специалистов



www.radelexpo.ru
(812) 718-35-37