

УДК 621.382.002

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЛУБОКОГО АНИЗОТРОПНОГО
ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ
ПРИ СОЗДАНИИ СИСТЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ 3D-IC**

К. т. н. А. А. Голишников¹, д. т. н. М. Г. Путря²

¹НПК «Технологический центр», ²Национальный исследовательский университет МИЭТ
Россия, г. Москва
A.Golishnikov@tcen.ru

Исследованы зависимости технологических характеристик процесса глубокого травления кремния от его операционных параметров. Разработан и оптимизирован процесс глубокого анизотропного плазменного травления кремния. Результаты работы использованы при формировании глубоких кремниевых структур.

Ключевые слова: глубокое анизотропное травление кремния, сквозные отверстия в кремнии, источник трансформаторно-связанной плазмы, технология трехмерной интеграции кристаллов

В настоящее время для изготовления полупроводниковых приборов уровня «Система в корпусе» активно развивается технология формирования трехмерных интегральных схем и систем интеграции кристаллов (3D-IC), позволяющая увеличить плотность компоновки элементов, быстродействие изделия, снизить потребляемую мощность и защитить схемотехническое решение от копирования [1].

Одной из важнейших технологических операций вышеуказанной технологии сборки является процесс плазменного травления (ПТ), используемый для создания сквозных отверстий (TSV) в кремнии при формировании металлических соединений между пакетированными схемами 3D-IC. Поскольку изготовление сквозных отверстий в кремнии сильно зависит от таких параметров как толщина Si, аспектное отношение, тип материала металлизации и т. д. [2], целью данной работы являлось исследование процесса глубокого анизотропного плазменного травления кремния для создания сквозных отверстий.

Известно несколько способов получения глубоких вертикальных структур в кремнии. Наиболее используемыми из них являются плазменные методы, так называемый «Bosch»-процесс и альтернативный ему — криопроецесс, реализуемые в источниках высокоплотной плазмы, например, в источниках индуктивно- и трансформаторно-связанной плазмы. Эти методы позволили заменить используемые до недавнего времени методы глубокого анизотропного жидкостного травления. В отличие от жидкостных анизотропных процессов, плазменное травление не столь чувствительно к кристаллографической ориентации кремния, может обеспечивать высокую селективность к материалу маски, является значительно более воспроизводимым и безопасным, чем альтернативные жидкостные процессы.

Характерными требованиями к процессам плазменного травления для формирования глубоких структур в Si являются высокие значения скорости, анизотропии и равномерности травления при одновременно высокой селективности процесса к маскирующему покрытию при травлении кремния. Кроме того, необходимо обеспечить минимальный уровень привносимых радиационных повреждений поверхности кремния.

В ходе работы решались следующие задачи: исследовалось влияние операционных параметров на скорость, анизотропию плазменного травления, селективность травления к фоторезистивной маске (ФРМ); оптимизировался процесс глубокого анизотропного плазменного травления кремния с целью получения максимальных технологических характеристик.

В качестве метода глубокого анизотропного плазменного травления (ГАПТ) кремния использовалась технология, предусматривающая чередование стадий травления и пассивации (полимеризации), ко-

торая реализована в экспериментальной установке «Платран-100» с реактором высокоплотной плазмы на основе ВЧ-источника с индуктивным возбуждением плазмы (источник трансформаторно-связанной плазмы, ТСП). Используемый реактор трансформаторно-связанной плазмы удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к процессам плазменного травления, обеспечивая высокую скорость травления (2 мкм/мин и более), высокую анизотропию и селективность процесса травления кремния к ФРМ и к оксиду кремния, высокую равномерность травления, минимальный уровень привносимых радиационных нарушений поверхности обрабатываемых материалов и незначительное влияние на электрофизические параметры обрабатываемых структур.

Рабочими газами при проведении процесса ГАПТ Si служили SF₆ (элегаз), используемый на стадии травления, и CHF₃ (хладон-23), применяемый на стадии полимеризации. Для улучшения теплоотвода от обрабатываемой подложки использовался вспомогательный газ — He, который подавался в промежуток между кремниевой пластиной и подложкодержателем.

Образцами для травления служили Si-пластины Ø100 мм со сформированной фоторезистивной маской (марка фоторезиста — Rohm Raas S1813 Sp15). Операционные параметры при проведении процесса ГАПТ Si изменялись в таких диапазонах: расход элгаса — $Q_{SF_6} = 200 — 400 \text{ см}^3/\text{мин}$, ВЧ-мощность $W_{\text{тр}} = 400 — 900 \text{ Вт}$, рабочее давление $P_{\text{тр}} = 30 — 100 \text{ мТорр}$, напряжение смещения $U_{\text{см}} = 0 — -50 \text{ В}$. На стадии пассивации операционные параметры были постоянными (не менялись) и равнялись $W_{\text{см}} = 10 \text{ Вт}$, $W_{\text{пас}} = 600 \text{ Вт}$, $Q_{CHF_3} = 250 \text{ см}^3/\text{мин}$, $P_{\text{пас}} = 60 \text{ мТорр}$.

Измерения толщины фоторезистивной маски до и после плазменного травления проводили на автоматизированной измерительной спектральной системе MPV-SP. Профили и геометрические параметры протравленных кремниевых структур исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM XL 40 фирмы Philips.

В ходе работы получены зависимости скорости травления кремния, анизотропии и селективности травления к ФРМ от операционных параметров процесса на стадии травления (ВЧ-мощности, напряжения смещения и расхода элгаса). После анализа полученных результатов исследований процесса глубокого анизотропного плазменного травления Si были выбраны оптимальные характеристики, которые позволили обеспечить следующие параметры технологической операции:

— скорость травления кремния	4 мкм/мин;
— селективность к фоторезисту	60;
— равномерность травления	95%;
— анизотропия	0,99;
— аспектное отношение (АО)	15.

Разработанный процесс глубокого анизотропного плазменного травления кремния был использован при формировании кремниевых структур, представленных на рис. 1.

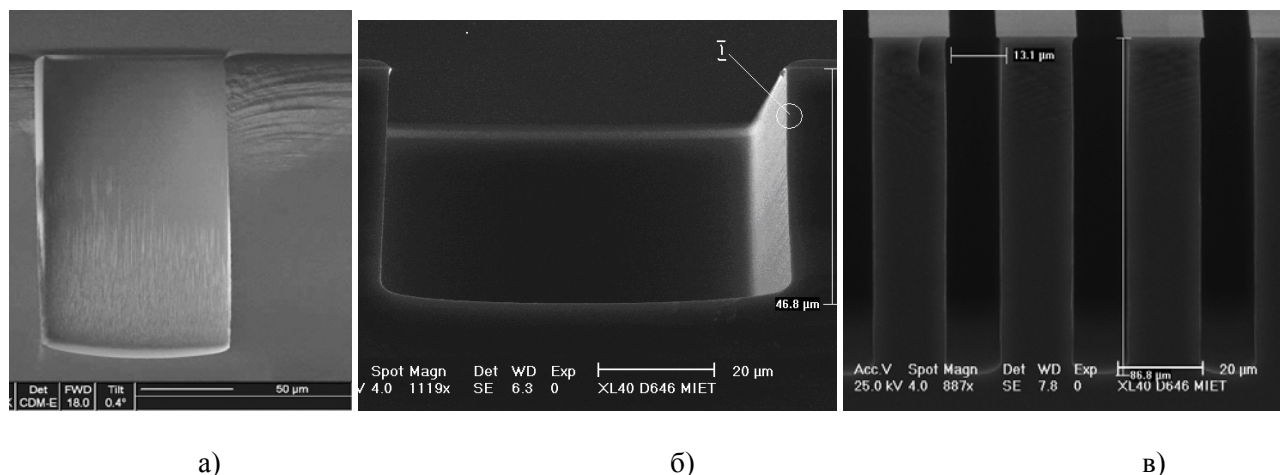


Рис. 1. Микропрофили отверстий, протравленных в кремнии:
 а) глубина травления $h_{Si} = 170 \text{ мкм}$, угол наклона боковой стенки $\alpha = 91^\circ$; б) $h_{Si} \approx 47 \text{ мкм}$, $\alpha = 92^\circ$, в) $h_{Si} \approx 87 \text{ мкм}$, угол наклона боковой стенки $\alpha = 90^\circ$

Кроме того, в ходе проведения исследований определены условия и причины формирования микроигл и столбчатых структур на поверхности кремния (см. рис. 2) в процессе глубокого анизотропного травления в двухстадийном, циклическом режиме в плазме SF_6/CHF_3 , которые, в первую очередь, связаны с эффектом «микромаскирования» поверхности, вызванным увеличением полимеризующей способности процесса ГАПТ в целом. Это вызвано в основном недостаточностью травящих частиц в ионном потоке, доходящем до дна структуры.

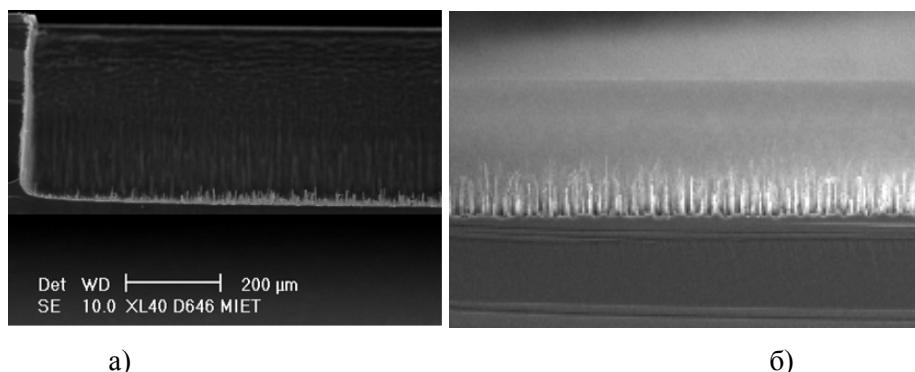


Рис. 2. Микрофотографии кремниевых структур после плазменного травления: а — профиль структуры; б — состояние поверхности дна структуры

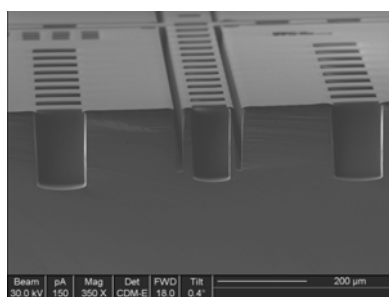


Рис. 3. Микрофотография структур с различными линейными размерами, полученными в одном процессе плазменного травления

Другой проблемой при глубоком анизотропном травлении кремниевых структур является зависимость скорости травления от линейных размеров элементов, так называемый «апертурный эффект». Проявление данного эффекта показано на рис. 3. Этот эффект связан с механизмом «задержки РИТ».

Таким образом, в результате исследования процесса глубокого травления кремния установлены корреляционные зависимости между основными технологическими характеристиками (скоростью, анизотропией, селективностью) процесса ГАПТ и операционными параметрами (ВЧ-мощностью на стадии травления, расходом рабочего газа (SF_6) на стадии травления), на основе которых оптимизирован и разработан процесс ГАПТ кремния. Получены глубокие структуры в кремнии, которые могут быть использованы в качестве межуровневых контактов при создании системы металлизации 3D-IC.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. 3D-ICs and Integrated Circuit Security — Tezzaron Semiconductor, February 7, 2008. <http://www.tezzaron.com>
2. Black B. et al. «Die Stacking (3D) Microarchitecture» Proc. 39th Ann. IEEE/ACM Int'l Symp. Microarchitecture.— IEEE CS Press, 2006.— P. 469—479.

A. A. Golishnikov, M. G. Putrya

Study of deep anisotropic plasma silicon etching for through-holes forming in the process of 3D-IC metallization system creation.

The dependence of the technological characteristics of the process of deep silicon etching on its operating parameters has been investigated. The authors have developed and optimized a process of deep anisotropic plasma etching of silicon. The results are used in the process of formation of deep silicon structures.

Keywords: *deep anisotropic etching of silicon, through holes in the silicon source is transformer-coupled plasma technology is the integration of three-dimensional crystals.*