

А. А. ГОЛИШНИКОВ<sup>1</sup>, М. Г. ПУТЯ<sup>2</sup>

Россия, г. Москва, <sup>1</sup>ГУ НПК «Технологический центр»,  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
 E-mail: A.Golishnikov@tcen.ru

## РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ГЛУБОКОГО ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОЙ ИНТЕГРАЦИИ КРИСТАЛЛОВ

*Исследованы зависимости технологических характеристик процесса глубокого травления кремния от его операционных параметров. Разработан и оптимизирован процесс глубокого плазменного травления кремния для создания сквозных отверстий с управляемым профилем.*

**Ключевые слова:** процесс глубокого травления кремния, сквозные отверстия в кремнии, TSV, 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, быстроедействие изделия, снизить потребляемую мощность и защитить схемотехническое решение от копирования [1, 2]. Одной из важнейших технологических операций такой технологии является процесс плазменного травления (ПТ), используемый для создания сквозных отверстий в кремнии (through-silicon via, TSV) при формировании металлических соединений между пакетированными схемами 3D-IC [3].

Известно несколько способов получения глубоких вертикальных отверстий 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, оно может обеспечивать высокую селективность к материалу маски и является значительно более воспроизводимым и безопасным.

Характерными требованиями к процессам плазменного травления для формирования глубоких отверстий в Si являются высокая скорость и равномерность травления при высокой селективности травления кремния по отношению к маскирующему покрытию. Кроме того, необходимо обеспечить возможность управления профилем формируемых отверстий. Известно, что одним из узких мест TSV-технологии является

операция заполнения отверстий металлическими проводящими слоями. Технология беспустотного заполнения отверстий, так же как и плотность размещения сквозных проводников, в свою очередь определяется профилем травления кремния [3–5]. Так, в случае достаточно тонкой кремниевой подложки, например до 30 мкм, сквозные отверстия с однослойной металлизацией из вольфрама или меди, как правило, можно выполнять вертикальными, а при толщине пластины, например, 100 мкм более предпочтителен наклонный профиль отверстий, упрощающий их беспустотное заполнение.

Очевидно, что технология изготовления сквозных отверстий в кремнии зависит от многих параметров. В настоящей работе проводилось исследование влияния операционных параметров процесса глубокого плазменного травления на его технологические характеристики с целью разработки и оптимизации процесса травления сквозных отверстий с управляемым профилем, используемого в технологии трехмерной интеграции кристаллов.

### Оборудование и методика проведения экспериментов

Процесс глубокого плазменного травления (ГПТ) кремния выполнялся по технологии, предусматривающей чередование стадий травления и пассивации (полимеризации). Начальной является стадия изотропного травления кремния, затем — осаждение полимерной пленки, которая образуется на всех поверхностях рельефа Si-структуры. Далее снова повторяется стадия травления, на которой происходит удаление полимерного слоя преимущественно с горизонтальных поверхностей за счет их ионной бомбардировки. При этом на боковых стенках остается пассивирующий слой, препятствующий боковому растравливанию.

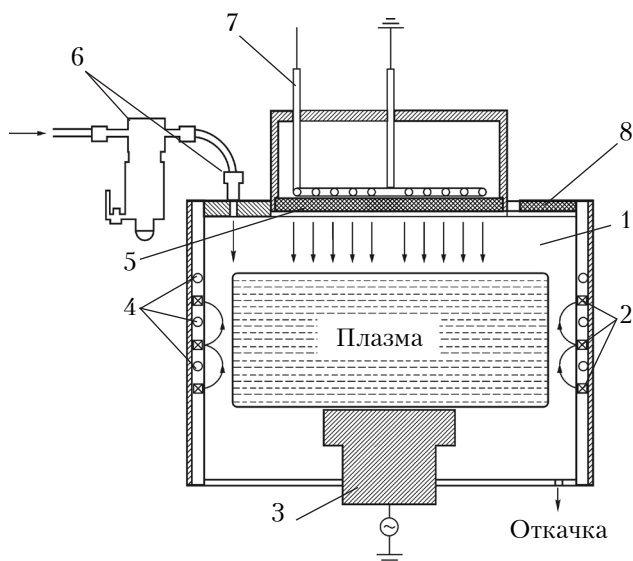


Рис. 1. Схема ТСП-реактора:

1 — вакуумная камера с источником плазмы; 2 — кольцевые постоянные магниты; 3 — столику-подложкодержатель; 4 — система водяного охлаждения камеры; 5 — кварцевое окно; 6 — каналы подачи газа; 7 — индуктор; 8 — смотровое окно

Для проведения ГПТ кремния использовалась экспериментальная установка «Платран-100» с реактором высокоплотной плазмы на основе ВЧ-источника с трансформаторно-связанной плазмой (ТСП), схема которого представлена на рис. 1. Используемый реактор позволяет удовлетворить современные требования, предъявляемые к процессам плазменного травления, таким как высокая скорость (2 мкм/мин и более), равномерность и анизотропия процесса травления, его селективность к фоторезисту и к оксиду кремния, минимальный уровень привносимых радиационных нарушений поверхности обрабатываемой структуры и незначительное влияние на ее электрофизические параметры.

В качестве рабочих газов были выбраны элегаз ( $\text{SF}_6$ ), используемый на стадии травления, и хладон-23 ( $\text{CHF}_3$ ), применяемый на стадии полимеризации. Для улучшения теплоотвода от обрабатываемой подложки использовался гелий, который подавался в промежуток между кремниевой пластиной и подложкодержателем.

Образцами для травления служили Si-пластины диаметром 100 мм со сформированной маской из фоторезиста марки Rohm Raas S1813 Sp15 толщиной 1,4 мкм, представляющей собой регулярные структуры с линейными размерами от 1,2 до 2,5 мкм.

Операционные параметры при проведении процесса ГПТ изменялись в таких диапазонах: расход элегаза  $Q_{\text{SF}_6}=200-400$  см<sup>3</sup>/мин, ВЧ-мощность, подводимая к индуктору при ПТ,  $W_{\text{тр}}=300-900$  Вт; значение ВЧ-мощности, под-

водимой к столику-подложкодержателю, было постоянным и составляло  $W_{\text{см}}=10$  Вт.

Операционные характеристики стадии пассивации не менялись: ВЧ-мощность  $W_{\text{пас}}=600$  Вт, расход хладона  $Q_{\text{CHF}_3}=250$  см<sup>3</sup>/мин, ВЧ-мощность смещения  $W_{\text{см}}=0$  Вт.

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

### Результаты экспериментов и их обсуждение

В ходе экспериментальных исследований были получены зависимости скорости травления кремния  $V_{\text{тр}}$  от расхода рабочего газа  $Q_{\text{SF}_6}$  и от ВЧ-мощности  $W_{\text{тр}}$ . Из приведенных на рис. 2 графиков видно, что первая из этих зависимостей носит более сложный характер, чем вторая.

Установлено, что при небольшом расходе элегаза скорость травления незначительна, поскольку в рабочем объеме содержится мало молекул рабочего газа и, соответственно, плотность химически активных (травя-

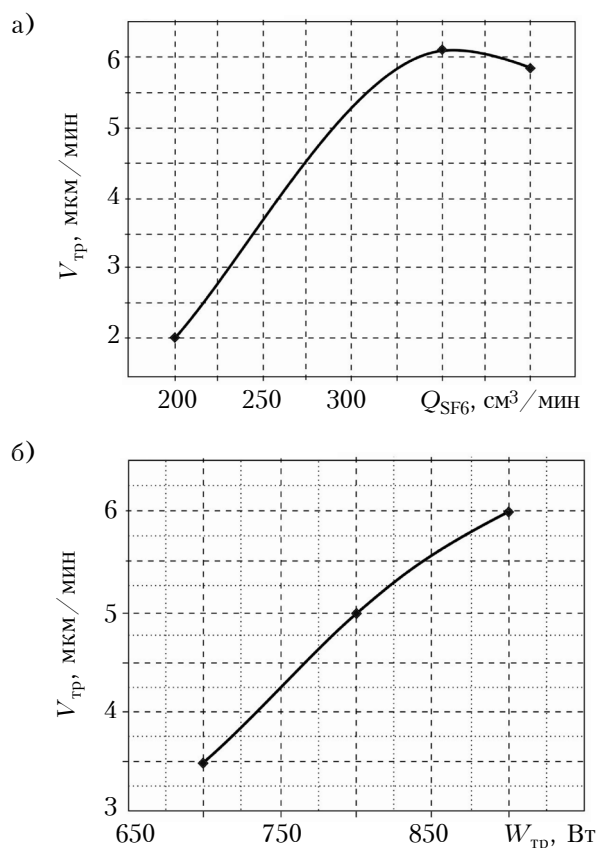


Рис. 2. Зависимость скорости травления кремния от расхода элегаза при  $W_{\text{тр}}=850$  Вт (а) и от ВЧ-мощности при  $Q_{\text{SF}_6}=400$  см<sup>3</sup>/мин (б)

щих) частиц невелика. При увеличении расхода  $\text{SF}_6$  с 200 до  $350 \text{ см}^3/\text{мин}$  скорость травления кремния возрастает в три раза — с 2 до  $6 \text{ мкм}/\text{мин}$  (см. рис. 2, а), что связано с эффективной доставкой молекул рабочего газа в зону ВЧ-разряда и повышением концентрации радикалов фтора. Однако при дальнейшем увеличении расхода скорость травления начинает падать, поскольку время нахождения химически активных частиц в вакуумной камере становится настолько малым, что они удаляются из рабочего объема, не успевая вступить в реакцию с обрабатываемой поверхностью.

При постоянном расходе рабочего газа и изменении ВЧ-мощности от 700 до 900 Вт скорость травления Si линейно возрастает примерно до  $6 \text{ мкм}/\text{мин}$  (см. рис. 2, б). Это объясняется тем, что при увеличении мощности, подводимой к плазменному разряду, происходит рост энергии свободных электронов плазмы, и при их столкновении с атомами и молекулами рабочего газа процессы ионизации и диссоциации происходят с большей вероятностью. В результате увеличивается число ионов и химически активных частиц, т. е. плотность травящих частиц, и, соответственно, возрастает скорость травления.

Увеличение ВЧ-мощности более 1000 Вт приводит к деградации фоторезистивной маски, что в конечном счете влияет на изменение линейных размеров формируемых структур и их конфигурации. Применение же ВЧ-мощности менее 300 Вт нецелесообразно, поскольку, во-первых, скорость травления кремния при этом незначительна (менее  $2 \text{ мкм}/\text{мин}$ ) и, во-вторых, существует риск остановки процесса травления Si, что наблюдается уже при  $W_{\text{тр}} = 300 - 400 \text{ Вт}$  (см. рис. 3). Это связано с преобладанием скорости осаждения пассивирующей пленки  $\text{C}_x\text{H}_y\text{F}_z$  во время полимеризации над скоростью ее удаления на стадии травления, что вызвано недостаточной плотностью энергетического потока, попадающего на нижнюю поверхность вытрав-

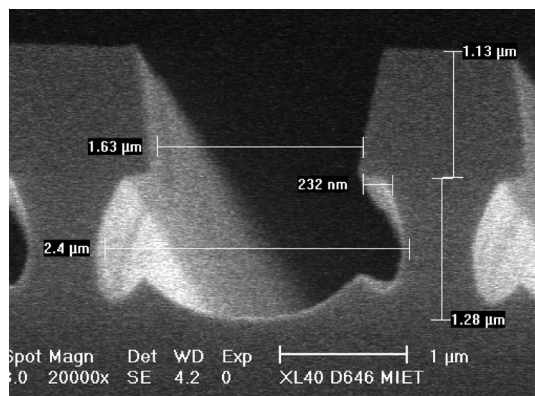
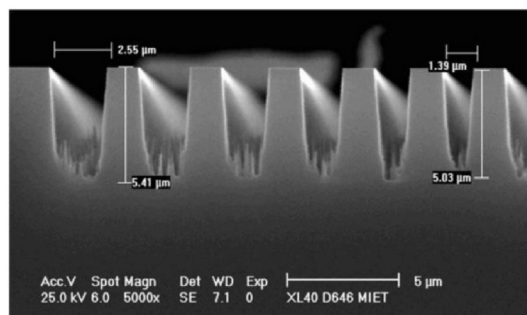


Рис. 3. Микрофотография профиля кремниевой структуры, полученной в процессе плазменного травления при  $W_{\text{тр}}=400 \text{ Вт}$ ,  $Q_{\text{SF}_6}=400 \text{ см}^3/\text{мин}$

а)



б)

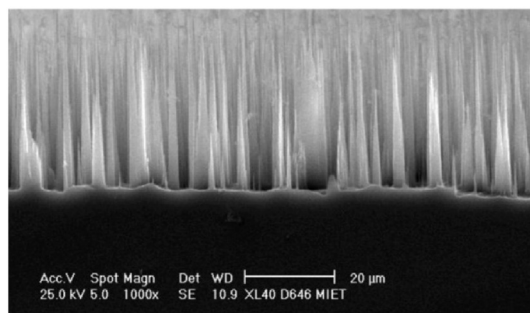


Рис. 4. Микрофотографии профиля Si-структуры после плазменного травления (а) и дна вытравленного отверстия (б)

ливаемого элемента. При этом скорость травления кремния по мере углубления внутрь образца снижается за счет отклонения ионов к боковым стенкам отверстий в связи с накоплением на них электростатического отрицательного заряда. Это приводит к тому, что с некоторого момента на поверхности кремния начинает расти фторуглеродная пленка, и в результате процесс травления останавливается.

При значении ВЧ-мощности  $W_{\text{тр}}=500 \text{ Вт}$  процесс травления кремния происходит, но на дне отверстий присутствуют микронеровности в виде игл и столбиков (см. рис. 4). Было установлено, что их возникновение обусловлено увеличением толщины фторуглеродной пленки, образующейся на поверхности кремния на стадии полимеризации в плазме  $\text{CHF}_3$ , и с недостаточной скоростью ее травления в плазме  $\text{SF}_6$ . При таких условиях на поверхности кремния образуются углеродные остатки травления фторуглеродной пленки, которые накапливаются на поверхности от цикла к циклу и представляют собой микромаскирующие покрытия, являющиеся причиной образования микронеровностей.

Установлено, что увеличение расхода рабочего газа в диапазоне  $200 - 400 \text{ см}^3/\text{мин}$  приводит к изменению угла наклона боковой поверхности элемента (см. рис. 5). Наблюдающееся уширение канавок объясняется, во-первых, недостаточной пассивацией боковых стенок с увеличением глубины. Во-вторых, это связано с тем, что при постоянной скорости откачки с увели-



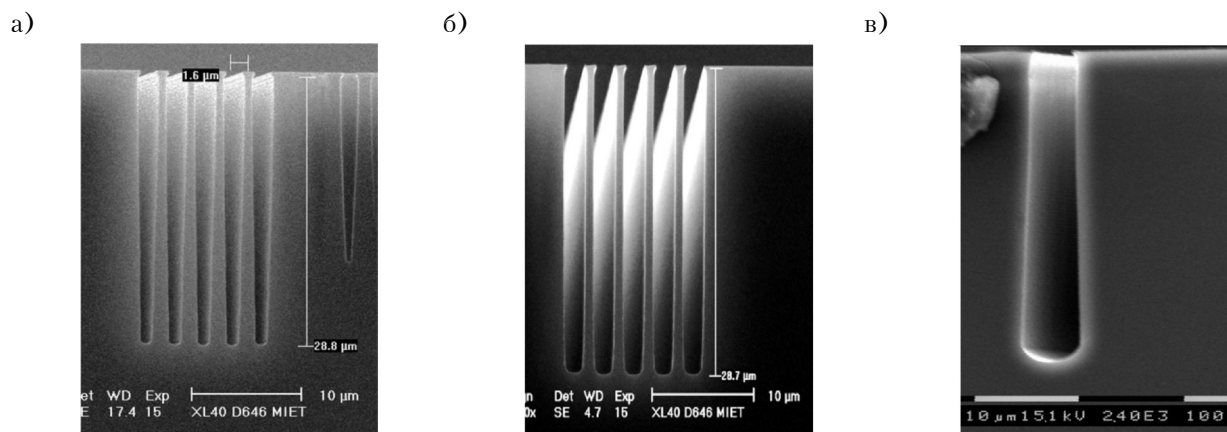


Рис. 5. Микрофотографии профилей Si-структур с различным углом наклона боковой стенки: а — 88°; б — 90°; в — 92°

чением расхода травящего газа возрастает и рабочее давление в камере (например, при расходе 300 см<sup>3</sup>/мин давление составляет примерно 35 мТорр, при расходе газа 400 см<sup>3</sup>/мин — около 60 мТорр). Рост давления приводит к более частым столкновениям между частицами плазмы и, соответственно, вероятность попадания химически активных частиц и ионов на боковые стенки вытравливаемых элементов увеличивается.

На рис. 6 видно, что боковая стенка имеет шероховатую поверхность с неровностью около 58 нм и шагом примерно 450 нм. Такое состояние поверхности кремния связано со спецификой проведения процесса ГПТ — чередованием стадий травления и полимеризации. Поскольку для получения высокой скорости травления Si в целом на стадии травления используется в качестве рабочего газа SF<sub>6</sub> без каких-либо пассивирующих добавок, травление носит ярко выраженный изотропный характер.

Увеличение ВЧ-мощности в диапазоне 700—900 Вт приводит к снижению селективности травления кремния по отношению к фоторезистивной маске  $S_{Si/фр}$  (см. рис. 7, а). Возможно, это связано с тем, что при увеличении ВЧ-мощности наблюдается рост не только плотности травящих ча-

стиц, но и интенсивности ионной бомбардировки, которая приводит к большему увеличению скорости травления фоторезистивной маски по сравнению с кремнием за счет отличия значений энергий связи этих материалов ( $E_{cbSi-Si}=200$  кДж/моль,  $E_{cbC-H}=440$  кДж/моль).

Из зависимости селективности травления  $S_{Si/фр}$  от расхода элегаза, приведенной на рис. 7, б видно, что увеличение расхода газа приводит к росту селективности. Это объясняется тем, что с увеличением расхода травящего газа SF<sub>6</sub> возрастает содержание фтора в рабочем объеме,

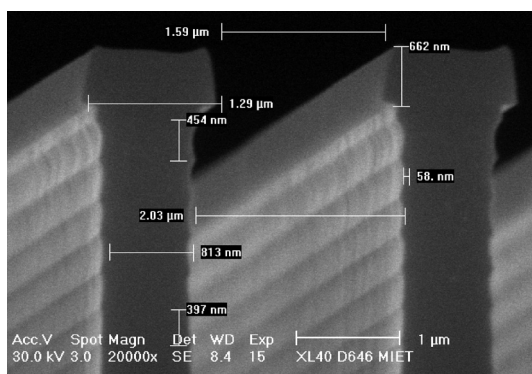


Рис. 6. Микрофотография боковых стенок элементов Si-структур, полученных после травления

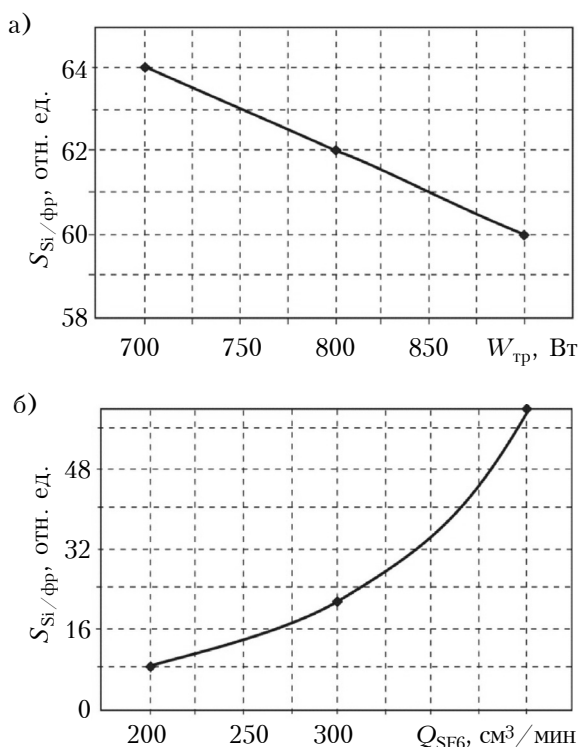


Рис. 7. Зависимость селективности травления кремния по отношению к фоторезисту от ВЧ-мощности при  $Q_{SF6}=400$  см<sup>3</sup>/мин (а) и от расхода элегаза при  $W_{тр}=900$  Вт (б)

что способствует увеличению скорости травления Si, причем большему, чем увеличение скорости травления фоторезиста.

При глубоком травлении кремниевых структур с различными линейными размерами наблюдается так называемый апертурный эффект. Этот эффект связан с механизмом «задержки» реактивного ионного травления, который возникает по трем причинам. Во-первых, из-за ионного затенения, делающего поступающие ионы изотропными в результате рассеивания и зарядового обмена в области пространственного заряда. Уменьшение рабочего давления снижает вероятность столкновений, позволяя большему количеству входящих ионов достигать нижней поверхности структуры. Следует отметить, что работа в режиме высокоплотной плазмы, который понижает толщину области пространственного заряда, снижает вероятность столкновений ионов с нейтральными частицами или столкновений с обменом заряда по сравнению с традиционными двухэлектродными системами реактивного ионного травления. Во-вторых, по причине «затенения» нейтральными частицами: из-за столкновения частиц как друг с другом, так и с боковыми стенками элементов, замедляется поток химически активных нейтральных частиц (например, F) внутрь структуры, и их доступ к нижней части структуры, что необходимо для удаления полимера и формирования летучих продуктов травления, затрудняется. В-третьих, из-за транспортировки нейтральных продуктов травления: обратный поток продуктов химической реакции со дна структуры может сталкиваться с входящими частицами или переосаждаться на дне структуры, значительно увеличивая толщину осаждаемого полимера.

Влияние апертурного эффекта на профиль структуры, полученный после травления, показано на **рис. 8**.

После анализа полученных результатов исследований процесса глубокого плазменного

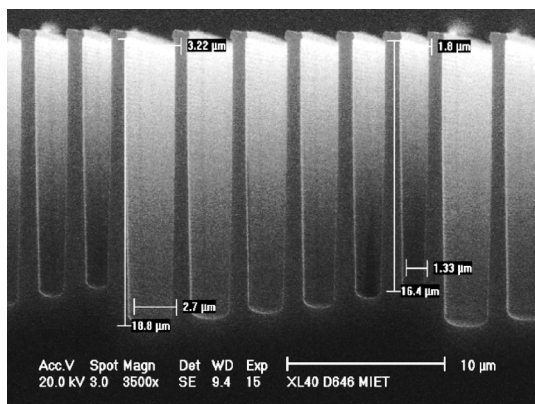


Рис. 8. Микрофотография элементов с различными линейными размерами, полученных в одном процессе плазменного травления

травления Si были выбраны следующие оптимальные значения операционных параметров:

- ВЧ-мощность на стадии пассивации 600 Вт;
- ВЧ-мощность на стадии травления 900 Вт;
- расход  $\text{SF}_6$  400  $\text{см}^3/\text{мин}$  (соответствует давлению 60 мТорр);
- расход  $\text{CHF}_3$  250  $\text{см}^3/\text{мин}$  (соответствует давлению 60 мТорр);
- отношение времени травления к времени пассивации 1,5;
- ВЧ-мощность на подложкодержателе 10 Вт (соответствует напряжению смещения -40 В).

Эти значения обеспечивают следующие параметры процесса ГПТ элементов с линейными размерами по ширине 1,6 мкм:

- скорость травления кремния 6 мкм/мин;
- селективность к фоторезисту 60;
- равномерность травления 95%;
- профиль травления  $90 \pm 2^\circ$ ;
- аспектное отношение 18.

Разработанный процесс глубокого плазменного травления кремния был использован при формировании отверстия глубиной 370 мкм и диаметром 120 мкм с углом наклона боковой стенки  $90^\circ$  (**рис. 9**).

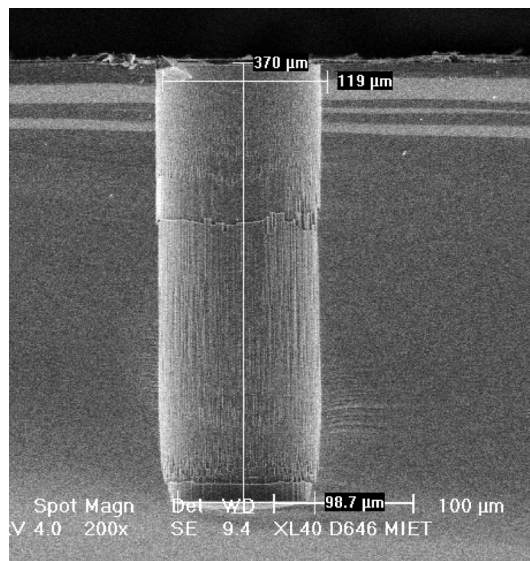


Рис. 9. Микропрофиль вытравленного отверстия в кремниевой структуре

## Выводы

Таким образом, в результате исследования процесса глубокого плазменного травления кремния установлены корреляционные зависимости между его основными технологическими характеристиками (скоростью, профилем травления, селективностью) и операционными параметрами (ВЧ-мощностью и расходом рабочего газа на стадии травления). Полученные результаты позволили разработать и оптимизировать процесс глубокого плазменного травления кремния с управ-

ляемым профилем формируемых сквозных отверстий, использующийся в технологии создания трехмерных интегральных схем и систем.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Topol A., La Tulipe D. C., Shi Jr., L., Frank D. J., Bernstein K., Steen S. E., Kumar A., Singco G. U., Young A. M., Guarini K. W., Jeong M. 3D Integrated Circuits // IBM Journal of Research and Development. — 2006. — Vol. 50. — N 4/5. — P. 491–506.

2. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам / Под ред. П.П. Мальцева. — Москва: Техносфера, 2005.

3. Motoyoshi M. Through-silicon via (TSV) // Proc. IEEE. — 2009. — Vol. 97. — N 1. — P. 43–48.

4. Wu X., Zhao W., Nakamoto M., Nimmagadda C. et al. Electrical characterization for intertier connections and timing analysis for 3-D ICs // IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst. — 2012. — Vol. 20, N 1. — P. 186–191.

5. Jang D. M., Ryu C., Lee K. Y., Cho B. H., Kim J., Oh T. S., Lee W. J., Yu J. Development and evaluation of 3-D SiP with vertically interconnected through silicon vias (TSV) // Proceedings of the Fifty-Seventh Electronic Components and Technology Conference. — 2007. — P. 847–852.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 08.10 2013 г.

О. А. ГОЛИШНИКОВ, М. Г. ПУТЯ

Россия, м. Москва, ДУ НВК «Технологический центр», Национальный исследовательский университет «МИТ»  
E-mail: A.Golishnikov@tcen.ru

## РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ ГЛИБОКОГО ПЛАЗМОВОГО ТРАВЛЕННЯ КРЕМНІЮ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТРИВИМІРНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ КРИСТАЛІВ

Досліджено залежності технологічних характеристик процесу глибокого травлення кремнію від його операційних параметрів. Розроблено та оптимізовано процес глибокого плазмового травлення кремнію для створення наскрізних отворів з керованим профілем.

Ключові слова: процес глибокого травлення кремнію, наскрізні отвори в кремнії, джерело трансформаторно-зв'язаної плазми, технологія тривимірної інтеграції кристалів.

DOI: 10.15222/TKEA2014.1.36  
УДК 621.382.002

<sup>1</sup> A. A. GOLISHNIKOV, <sup>2</sup> M. G. PUTRYA

Russia, Moscow, <sup>1</sup>PI SIC «Technology Center»,  
<sup>2</sup>National Research University «MIET»  
E-mail: A.Golishnikov@tcen.ru

## DEVELOPMENT OF DEEP SILICON PLASMA ETCHING FOR 3D INTEGRATION TECHNOLOGY

Plasma etch process for through-silicon via (TSV) formation is one of the most important technological operations in the field of metal connections creation between stacked circuits in 3D assemble technology. TSV formation strongly depends on parameters such as Si-wafer thickness, aspect ratio, type of metallization material, etc. The authors investigate deep silicon plasma etch process for formation of TSV with controllable profile. The influence of process parameters on plasma etch rate, silicon etch selectivity to photoresist and the structure profile are researched in this paper. Technology with etch and passivation steps alternation was used as a method of deep silicon plasma etching. Experimental tool «Platrane-100» with high-density plasma reactor based on high-frequency ion source with transformer coupled plasma was used for deep silicon plasma etching. As actuation gases for deep silicon etching were chosen the following gases: SF<sub>6</sub> was used for the etch stage and CHF<sub>3</sub> was applied on the polymerization stage. As a result of research, the deep plasma etch process has been developed with the following parameters: silicon etch rate 6 μm/min, selectivity to photoresist 60 and structure profile 90±2°. This process provides formation of TSV 370 μm deep and about 120 μm in diameter.

Keywords: deep silicon plasma etching, through-silicon via, transformer coupled plasma source, 3D integration technology.

#### REFERENCES

1. Topol A., La Tulipe D. C., Shi Jr., L., Frank D. J., Bernstein K., Steen S. E., Kumar A., Singco G. U., Young A. M., Guarini K. W., Jeong M. 3D integrated circuits. IBM Journal of Research and Development, 2006, vol. 50, no 4/5, pp. 491-506.

2. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. Ot issledovaniy k razrabotkam. Ed. by P.P. Mal'tsev, Moscow, Tekhnosfera, 2005.

3. Motoyoshi M. Through-silicon via (TSV). Proc. IEEE, 2009, vol. 97, no 1, pp. 43-48.

4. Wu X., Zhao W., Nakamoto M., Nimmagadda Ch., D. Lisk, Gu S., Radojcic R., Nowak M., Xie Y. Electrical characterization for intertier connections and timing analysis for 3-D ICs. IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst., 2012, vol. 20, no 1, pp. 186-191.

5. Jang D. M., Ryu C., Lee K. Y., Cho B. H., Kim J., Oh T. S., Lee W. J., Yu J. Development and evaluation of 3D SiP with vertically interconnected through silicon vias (TSV). Proc. of the Fifty-Seventh Electronic Components and Technology Conference, 2007, pp. 847-852.