

Исследование технологии глубокого реактивно-ионного травления на установке МВУ ТМ Плазма 06

О.П. Гуцин¹, А.С. Валеев¹, А.А. Чамов², Н.Г. Мицын¹, В.М. Долгополов³, В.В. Одинокоев³,
В.Э. Немировский³, П.А. Иракин³

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»
(АО «НИИМЭ»)

² Открытое акционерное общество «НИИ молекулярной электроники и завод Микрон»
(ОАО «НИИМЭ и Микрон»)

³ Открытое акционерное общество Научно-исследовательский институт точного машиностроения (ОАО НИИТМ)

Аннотация

Процесс глубокого травления кремния с применением попеременных процессов травления и пассивации («Bosch»-процесс) был запатентован Робертом Бошем (Robert Bosch) в 1994 году и с тех пор активно применяется для травления кремниевых структур с высоким аспектным отношением. Суть процесса заключается в чередовании стадий реактивно-ионного травления поверхности кремния (как правило, в SF_6) и пассивации поверхности (как правило, с применением C_4F_8) [1, 2]. При этом на стадии травления пассивирующий слой удаляется со дна канавок быстрее, чем со стенок, что в итоге позволяет получить анизотропность процесса травления.

К преимуществам процесса можно отнести: проведение процесса при комнатных температурах, высокую селективность к фоторезисту (около 80:1 и более), получение структур с аспектным отношением до 30:1 [3], скорость травления до 20 мкм/мин, а также контролируемый профиль травления [4].

Основным недостатком процесса является шероховатость стенок (scallops) в связи с цикличностью процесса.

В основном «Bosch»-процесс используют при изготовлении трехмерных структур с применением технологии формирования глубоких отверстий в кремнии (through-silicon vias, TSV), а также при изготовлении микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Основным преимуществом технологии TSV является улучшение характеристик изделий при уменьшении занимаемой площади. Так фирмы Samsung Electronics [5] (Южная Корея) и Micron Technology [6] (США) разработали чипы памяти с применением технологии TSV, пропускная способность которых увеличена вплоть до 320 ГБ/сек. При этом данные чипы требуют примерно на 70% меньше энергии, чем существующие на данный момент чипы DDR3.

В настоящее время технология формирования глубоких отверстий в кремнии представляет большой интерес для отечественной микроэлектроники. Однако необходимое промышленное оборудование может быть представлено только импортными образцами ведущих разработчиков (LAM, SPTS) и имеет большую стоимость.

Целью данной работы была разработка реактора для глубокого травления кремния, аналогичного по своим характеристикам импортному и разработка технологии глубокого травления кремния для ее применения в изготовлении трехмерных TSV-структур, а также травления канавок с гладкими стенками в кремниевой пластине для формирования целевой изоляции.

Ключевые слова: глубокое травление кремния, «Bosch»-процесс, трехмерная сборка, 3D-сборка, гладкие щели.

Research and development of deep silicon etching equipment and technology

O.P. Gushin¹, A.S. Valeev¹, A.A. Chamov², N.G. Mitsyn¹, V.M. Dolgoplov³, V.V. Odinokov³, V.E. Nemirovskiy³, P.A. Irakin³

¹ Molecular electronics research institute JSC (MERI JSC)

² Mikron JSC

³ Research institute of precision machine manufacturing (NIITM)

Abstracts

The deep silicon etch process using alternating etching and passivation steps (“Bosch” process) was patented by Robert Bosch in 1994 and since has been actively used for etching high aspect ratio structures in silicon wafer. The essence of the process lies in alternating steps of reactive-ion etching of silicon (usually SF₆) and passivation of the surface (typically by using C₄F₈) [1, 2]. Herewith the step of etching the passivation layer removing from the bottom of the grooves are faster than from the walls, with the result that allows to obtain anisotropic etching process.

Advantages of the process include: carrying out the process at room temperatures, high photoresist selectivity (about 80:1 and more), the preparation of structures with an aspect ratio of 30:1 [3], the etch rate up to 20 μm/min and controlled etching profile [4].

The main drawback of the process is the roughness of the walls (scallops) in connection with the cyclical process.

Basically “Bosch” process used for manufacturing of three-dimensional structures with through-silicon vias (TSV) forming, as well as in the manufacture of micro electromechanical systems (MEMS).

The main advantage of TSV technology is improving the characteristics of devices while reducing occupied area. Samsung Electronics [5] (South Korea) and Micron Technology [6] (USA) have developed memory chips using the TSV technology which has a max bandwidth up to 320 GB/sec. This data chips use approximately 70% less power than currently existing DDR3 chips.

Currently, technology of deep holes etching is of great interest to the domestic microelectronics. However, the necessary industrial equipment for 200 mm wafers can be represented only imported models leading developers (LAM, SPTS) and has a greater cost.

The aim of this work was to develop a reactor for deep silicon etching, similar in their characteristics with import and development of technology deep silicon etching for its use in the manufacture of three-dimensional TSV assembly, as well as etching trenches with smooth sidewalls in the silicon wafer for trench isolation forming.

Keywords: deep silicon etching, “Bosch” process, three dimensional assembly, 3D-assembly, smooth sidewalls trenches.

Эксперимент

Отработка реактора и технологии для глубокого травления кремния проводились на базе конструктива установки “МВУ ТМ ПЛАЗМА 06”, разработанной в ОАО «НИИ Точного Машиностроения». Внешний вид установки представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. Установка глубокого анизотропного травления МВУ ТМ Плазма 06.

Схема реактора представлена на рисунке 2. Разряд зажигается в реакционной камере (диаметром 180 мм и высотой 100 мм). ИСП источником с помощью ВЧ генератора (частота 13,56 МГц, мощность 1 кВт) через согласующее устройство. Для задания необходимого отрицательного смещения на охлаждаемый электрод-подложкодержатель от отдельного ВЧ генератора (частота 13,56 МГц, мощность 600 Вт) через согласующее устройство подавалось смещение. Высоковакуумная система откачки на базе турбомолекулярного и форвакуумного насосов обеспечивала предельный остаточный вакуум $1 \cdot 10^{-3}$ Па.

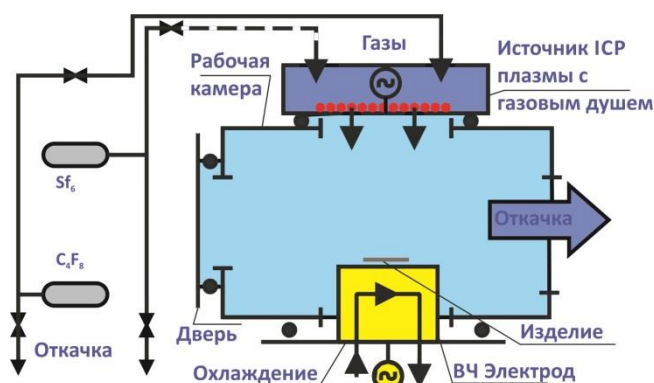


Рисунок 2. Схема реактора установки МВУ ТМ Плазма 06.

Параметры подбирались для получения процесса, необходимого для изделий, которые в дальнейшем предполагается производить в ОАО «НИИМЭ и Микрон».

Результаты экспериментов

Первые эксперименты проводились на пластинах диаметром 100 мм. На пластинах предварительно были сформированы маски из оксида кремния толщиной 0,6 мкм и фоторезиста толщиной 2,2 мкм. На фоторезисте присутствуют отверстия диаметрами 2, 3, 5 и 10 мкм. При получении приемлемого показателя неоднородности травления по пластине, наряду с пластинами диаметром 100 мм были проведены эксперименты на пластинах диаметром 150 мм.

Для проверки процесса глубокого травления кремния была проведена операция со следующими параметрами:

- время процесса: 20 ÷ 25 минут;
- температура столика: 14 °С.

Результаты процесса приведены на рисунке 3.

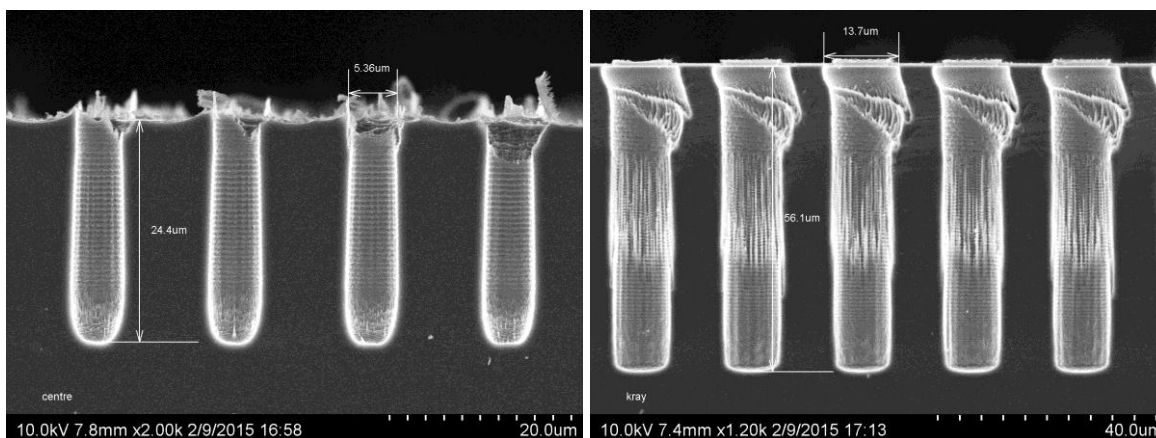


Рисунок 3. РЭМ-снимки после операции травления первой пластины диаметром 100 мм.

Были получены неудовлетворительные результаты по неоднородности травления по площади пластины. Нами установлено, что основной причиной неоднородности травления по глубине является большая термонеоднородность. Для улучшения условий термостабилизации операции глубокого травления кремния было решено наносить на поверхность столика-подложкодержателя тонкий слой инертной жидкости, отличающейся высоким давлением насыщенного пара и высокой теплопроводностью. Нами установлено, уже на результатах травления второй пластины можно констатировать значительные улучшения однородности по глубине, по площади пластины (рисунок 4):

- улучшена равномерность при отсутствии прижима пластины и гелиевого охлаждения;
- наличие значительной селективности к фоторезисту и окислу по всей поверхности пластины.

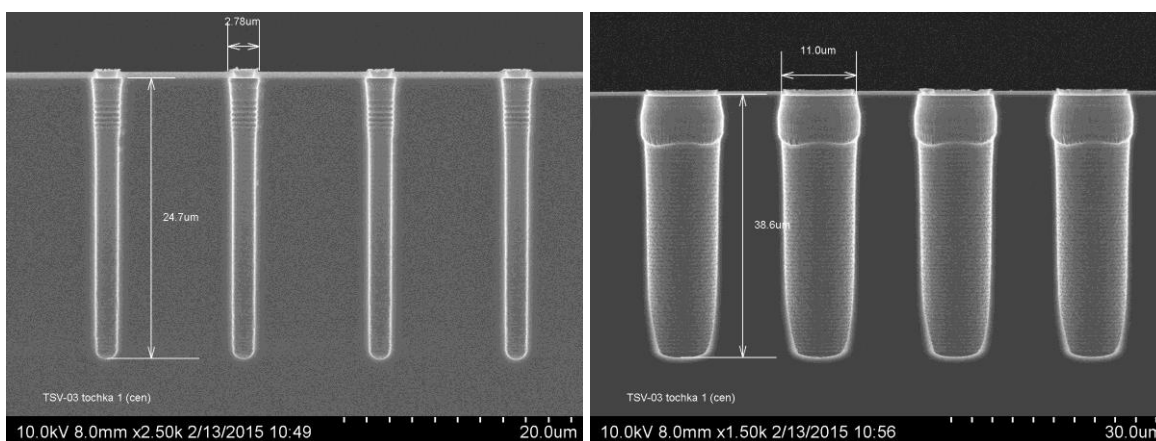


Рисунок 4. РЭМ-снимки после операции травления второй пластины диаметром 100 мм.

Сравнение показателей по неоднородности травления по пластине для первой и второй пластины представлены на рисунке 5.

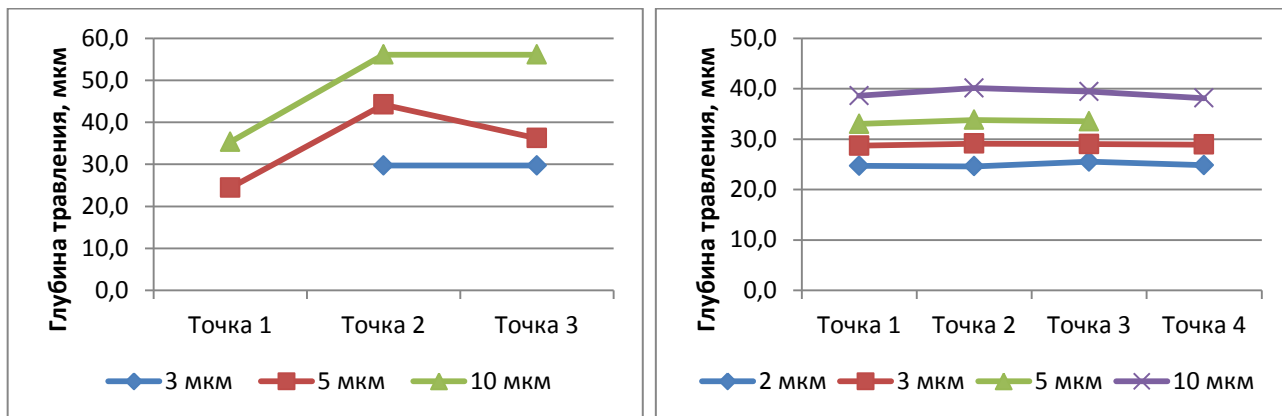


Рисунок 5. Сравнение показателей неоднородности травления по пластине для первой и второй пластин диаметром 100 мм.

Сопоставление точек на графиках точкам на пластинах представлено на рисунке 6, а) и 6, б). В дальнейшем измерения на пластине проводились по пяти точкам, как показано на рисунке 6, в).

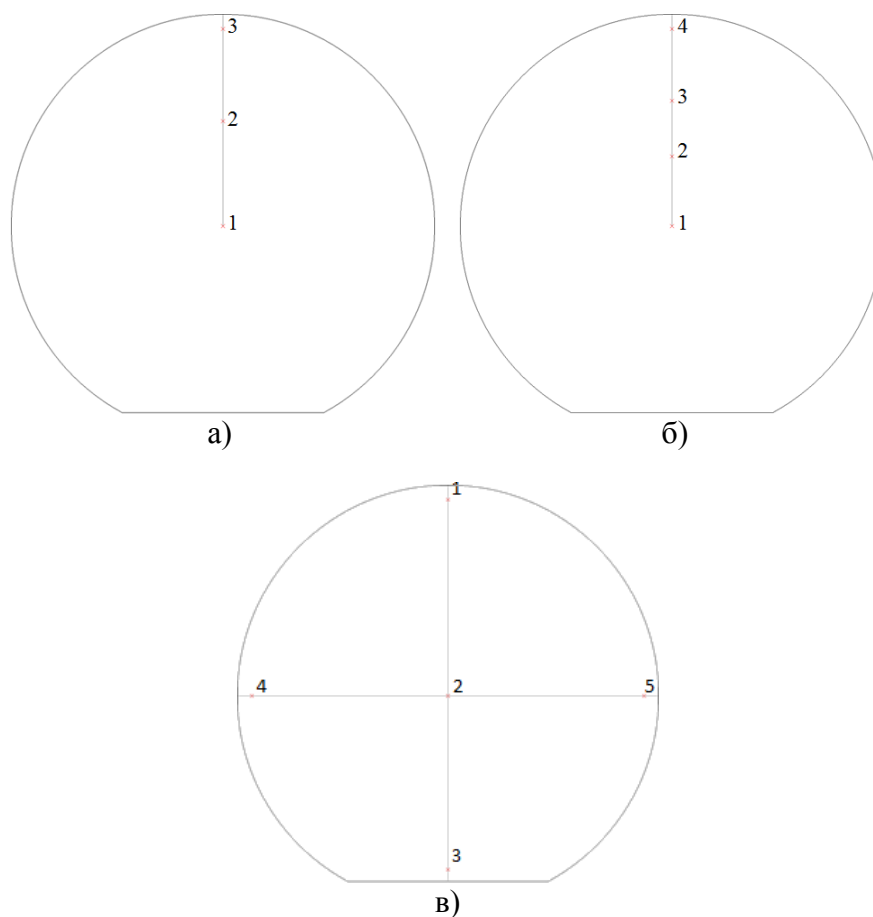


Рисунок 6. Сопоставление точек на графиках точкам на пластинах.
 а) для первой пластины;
 б) для второй пластины;
 в) для остальных пластин.

Следующим шагом была попытка сформировать отверстия большой глубины. На рисунке 7 представлены результаты травления пластины на глубину около 70 мкм для отверстий диаметром 10 мкм.

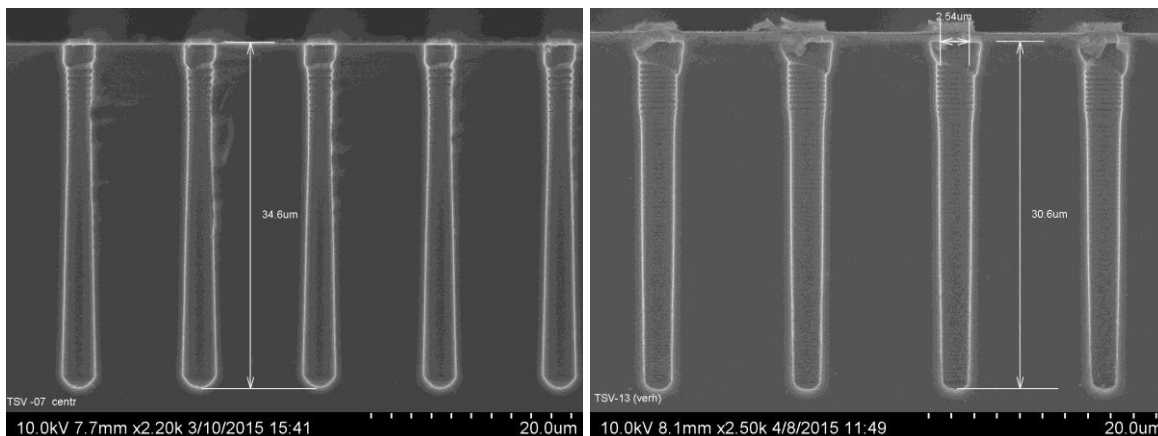


Рисунок 7. РЭМ-снимки после операции травления на глубину ≈ 70 мкм для пластины диаметром 100 мм.

Одновременно с обработкой процесса глубокого травления кремния для многоуровневой 3D-сборки кристаллов были проведены эксперименты по травлению канавок с гладкими стенками для щелевой изоляции. Были получены образцы с приемлемыми параметрами, как по глубине травления, так и по гладкости стенок. Результаты травления приведены на рисунке 8.

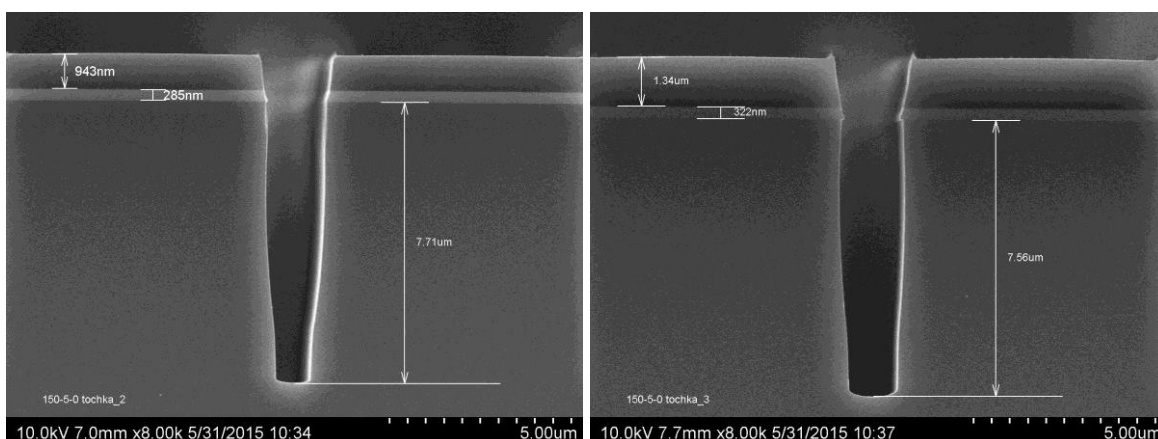


Рисунок 8. РЭМ-снимки после операции травления канавок с гладкими стенками на пластине диаметром 150 мм.

Для данного процесса также были рассчитаны показатели неоднородности травления. Результаты показаны на рисунке 9.

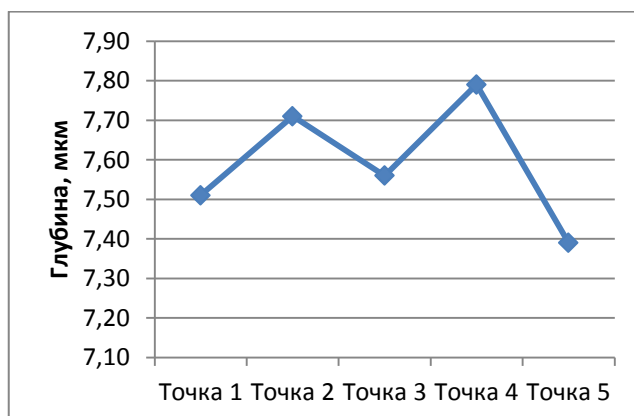


Рисунок 9. Расчет неоднородности травления канавок с гладкими стенками на пластине диаметром 150 мм.

Было посчитано, что неоднородность травления лежит в пределах 2 – 3 %.

Выводы

Разработан реактор для формирования углублений в кремнии, включающие «Bosch»-процесс, а также глубокие щели с гладкими стенками.

Одним из основных параметров глубокого травления кремния является неоднородность травления по пластине. В связи с этим был исследован и разработан метод термостабилизации, позволяющий получить значения неоднородности процесса травления в пределах 2 – 3 %.

Были получены глубокие отверстия с большим аспектным отношением для применения при изготовлении трехмерныхборок со сквозными проводниками, а также отверстия с гладкими стенками для применения при формировании щелевой изоляции.

Литература

1. Амиров И.И., Морозов О.В., Кальнов В.А., Лукичев В.Ф., Орликовский А.А., «Ключевые процессы технологии микросистемной техники: плазмохимические процессы глубокого анизотропного травления кремния», Нанотехнологии и наноматериалы, №4(66) июль-август, стр. 8-13.
2. Амиров И.И., Изюмов М.О., Морозов О.В., «Анизотропное травление глубоких канавок в кремнии во фторсодержащей плазме», 2008 год, стр. 653-656.
3. Oxford Plasma Technology, «Deep Si Etching at room temperature: the "Bosch" process» (http://www.oxfordplasma.de/process/sibo_1.htm).
4. Oxford Plasma Technology, «High Rate Bosch Process by ICP Accelerator» (http://www.oxfordplasma.de/process/sibo_acc.htm).
5. Samsung begins to produce 64GB DDR4 modules based on TSV chips (<http://www.kitguru.net/components/memory/anton-shilov/samsung-begins-to-produce-64gb-ddr4-memory-modules-based-on-tsv-chips/>).
6. Micron's 320GB/sec Hybrid Memory Cube comes to market in 2013, threatens to finally kill DDR SDRAM (<http://www.extremetech.com/computing/152465-microns-320gbsec-hybrid-memory-cube-comes-to-market-in-2013-threatens-to-finally-kill-ddr-sdram>).

АННОТАЦИИ

Исследование и разработка оборудования и технологии глубокого травления кремния

О.П. Гушин¹, А.С. Валеев¹, А.А. Чамов², Н.Г. Мицын¹, В.М. Долгополов³, В.В. Одинок³, В.Э. Немировский³, П.А. Иракин³

Процесс глубокого травления кремния с применением попеременных процессов травления и пассивации («Bosch»-процесс) был запатентован Робертом Бошем (Robert Bosch) в 1994 году и с тех пор активно

ABSTRACTS

Research and development of deep silicon etching equipment and technology

O.P. Gushin¹, A.S. Valeev¹, A.A. Chamov², N.G. Mitsyn¹, V.M. Dolgopolo³, V.V. Odinokov³, V.E. Nemirovskiy³, P.A. Irakin³

The deep silicon etch process using alternating etching and passivation steps ("Bosch" process) was patented by Robert Bosch in 1994 and since has been actively used for etching high aspect ratio structures in silicon wafer. The essence of

применяется для травления кремниевых структур с высоким аспектным отношением. Суть процесса заключается в чередовании стадий реактивно-ионного травления поверхности кремния (как правило, в SF_6) и пассивации поверхности (как правило, с применением C_4F_8) [1, 2]. При этом на стадии травления пассивирующий слой удаляется со дна канавок быстрее, чем со стенок, что в итоге позволяет получить анизотропность процесса травления.

К преимуществам процесса можно отнести: проведение процесса при комнатных температурах, высокую селективность к фоторезисту (около 80:1 и более), получение структур с аспектным отношением до 30:1 [3], скорость травления до 20 мкм/мин, а также контролируемый профиль травления [4].

Основными недостатками процесса являются: недостаточная скорость, а также шероховатость стенок (scallops) в связи с цикличностью процесса.

В основном «Bosch»-процесс используют при изготовлении трехмерных структур с применением технологии формирования глубоких отверстий в кремнии (through-silicon vias, TSV), а также при изготовлении микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Основным преимуществом технологии TSV является улучшение характеристик изделий при уменьшении занимаемой площади. Так фирмы Samsung Electronics [5] (Южная Корея) и Micron Technology [6] (США) разработали чипы памяти с применением технологии TSV, пропускная способность которых увеличена вплоть до 320 ГБ/сек. При этом данные чипы требуют примерно на 70% меньше энергии, чем существующие на данный момент чипы DDR3.

В настоящее время технология формирования глубоких отверстий в кремнии представляет большой интерес для отечественной микроэлектроники. Однако необходимое промышленное оборудование может быть представлено только импортными образцами ведущих разработчиков (LAM, SPTS) и имеет большую стоимость.

Целью данной работы была разработка реактора для глубокого травления кремния, аналогичного по своим характеристикам импортному и разработка технологии глубокого травления кремния для ее применения в изготовлении трехмерных TSV-

the process lies in alternating steps of reactive-ion etching of silicon (usually SF_6) and passivation of the surface (typically by using C_4F_8) [1, 2]. Herewith the step of etching the passivation layer removing from the bottom of the grooves are faster than from the walls, with the result that allows to obtain anisotropic etching process.

Advantages of the process include: carrying out the process at room temperatures, high photoresist selectivity (about 80:1 and more), the preparation of structures with an aspect ratio of 30:1 [3], the etch rate up to 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ and controlled etching profile [4].

The main drawbacks of the process are: lack of speed and the roughness of the walls (scallops) in connection with the cyclical process.

Basically “Bosch” process used for manufacturing of three-dimensional structures with through-silicon vias (TSV) forming, as well as in the manufacture of micro electromechanical systems (MEMS).

The main advantage of TSV technology is improving the characteristics of devices while reducing occupied area. Samsung Electronics [5] (South Korea) and Micron Technology [6] (USA) have developed memory chips using the TSV technology which has a max bandwidth up to 320 GB/sec. This data chips use approximately 70% less power than currently existing DDR3 chips.

Currently, technology of deep holes etching is of great interest to the domestic microelectronics. However, the necessary industrial equipment for 200 mm wafers can be represented only imported models leading developers (LAM, SPTS) and has a greater cost.

The aim of this work was to develop a reactor for deep silicon etching, similar in their characteristics with import and development of technology deep silicon etching for its use in the manufacture of three-dimensional TSV assembly, as well as etching trenches with smooth sidewalls in the silicon wafer for trench isolation forming.

Keywords: deep silicon etching, “Bosch” process, three dimensional assembly, 3D-assembly, smooth sidewalls trenches.

¹ Molecular electronics research institute JSC: 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1.

² Mikron JSC: 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1.

³ Research institute of precision machine

структур, а также травления канавок с гладкими стенками в кремниевой пластины для формирования щелевой изоляции.

Ключевые слова: глубокое травление кремния, «Bosch»-процесс, трехмерная сборка, 3D-сборка, гладкие щели.

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»: 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-ый Западный проезд, д. 12/1.

² Открытое акционерное общество «НИИ молекулярной электроники и завод Микрон»: 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-ый Западный проезд, д. 12/1.

³ НИИ точного машиностроения: 124460, Россия, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10.

Сведения об авторах:

Гущин Олег Павлович: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»; 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-ый Западный проезд, д. 12/1; ogushin@mikron.ru.

Валеев Адиль Салихович: доктор технических наук, профессор; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»; 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-ый Западный проезд, д. 12/1; avaleev@mikron.ru.

Чамов Александр Анатольевич: Открытое акционерное общество «НИИ молекулярной электроники и завод Микрон»; 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-ый Западный проезд, д. 12/1; achamov@mikron.ru.

Мицын Никита Геннадьевич: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»; 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-ый Западный проезд, д. 12/1; nmitsyn@mikron.ru.

Долгополов Владимир Миронович: кандидат технических наук; Открытое акционерное общество Научно-исследовательский институт точного машиностроения; 124460, Россия, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10; step455@mail.ru.

Одинокое Вадим Васильевич: доктор технических наук, профессор; Открытое акционерное общество Научно-исследовательский институт точного машиностроения; 124460, Россия, Москва,

manufacturing: 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Panfilovsky prospekt, 10.

Data of authors:

Gushin Oleg Pavlovich: Molecular electronics research institute JSC; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1; ogushin@mikron.ru.

Valeev Adil Salihovich: PhD, professor; Molecular electronics research institute JSC; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1; avaleev@mikron.ru.

Chamov Aleksandr Anatolievich: Mikron JSC; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1; achamov@mikron.ru.

Mitsyn Nikita Gennadievich: Molecular electronics research institute JSC; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1; nmitsyn@mikron.ru.

Dolgoplov Vladimir Mironovich: PhD; Research institute of precision machine manufacturing; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Panfilovsky prospekt, 10; step455@mail.ru.

Odinokov Vadim Vasilievich: PhD, professor; Research institute of precision machine manufacturing; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Panfilovsky prospekt, 10; vodinokov@niitm.ru.

Nemirovskiy Vladimir Eduardovich: Research institute of precision machine manufacturing; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Panfilovsky prospekt, 10; vlednem@mail.ru.

Irakin Pavel Aleksandrovich: Research institute of precision machine manufacturing; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Panfilovsky prospekt, 10; irakinp@gmail.com.

Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10;
vodinokov@niitm.ru.

Немировский Владимир Эдуардович:
Открытое акционерное общество Научно-
исследовательский институт точного
машиностроения; 124460, Россия, Москва,
Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10;
vlednem@mail.ru.

Иракин Павел Александрович: Открытое
акционерное общество Научно-
исследовательский институт точного
машиностроения; 124460, Россия, Москва,
Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10;
irakinp@gmail.com.