

Ионно-плазменное оборудование для глубокого анизотропного травления кремния в технологиях формирования глубоких отверстий

*В.М. Долгополов, В.В. Одинокоев, П.А. Иракин, В.М. Варакин, А.В. Шубников,
Н.Г. Мицын

Москва, Зеленоград, ОАО НИИТМ, Панфиловский проспект, д. 10;

**Москва, Зеленоград, АО «НИИМЭ», 1-ый Западный проезд, д.12/1*

E-mail: marketing@niitm.ru

При изготовлении трехмерных структур с применением технологии формирования глубоких отверстий в кремнии (*through-siliconvias, TSV*), а также при изготовлении микроэлектромеханических систем (*МЭМС*) широкое распространение получил процесс глубокого анизотропного травления кремния с применением попеременных процессов травления и пассивации («*Bosch*»-процесс). В настоящее время технология формирования глубоких отверстий в кремнии (*through-siliconvias, TSV*) представляет большой интерес для отечественной микроэлектроники. Однако необходимое промышленное оборудование для пластин 200 мм может быть представлено только импортными образцами ведущих разработчиков (*LAM, SPTS*) и имеет большую стоимость.

Целью данной работы была разработка реактора для глубокого травления кремния на пластинах диаметром до 200 мм, аналогичного по своим характеристикам импортному и разработка технологии глубокого травления кремния для ее применения в изготовлении трехмерных *TSV*-структур.

Ion-plasma equipment for deep anisotropic silicon etching in deep hole formation technologies. V.M. Dolgoplov, V.V. Odinokov, P.A. Irakin, V.M. Varakin, A.V. Shubnikov, N.G.Mitsyn. Process of deep anisotropic silicon etching with alternating steps of etching and passivation (“Bosch” process) is widely used for forming three-dimensional structures with through-silicon-vias (TSV), as well as in the manufacturing of micro electromechanical systems (MEMS). The essence of 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) 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 by imported models of leading developers (LAM, SPTS) and is very expensive.

The aim of this work was to develop a reactor for deep silicon etching on plates with diameter of up to 200 mm, similar in their characteristics with import and development of technology deep silicon etching for its use in the manufacture of three-dimensional TSV assembly.

Эксперимент

Отработка реактора и технологии для глубокого травления кремния проводилась на базе конструктива установки ПЛАЗМА ТМ 200-02К, разработанной в ОАО «НИИ Точного Машиностроения». Внешний вид установки представлен на рис. 1.



Рис. 1. Установка глубокого анизотропного травления ПЛАЗМА ТМ 200-02К.

Схема реактора представлена на рис. 2. Разряд зажигается в реакционной камере (диаметром 400 мм). ИСР источником с помощью ВЧ генератора (частота 13,56 МГц, мощность до 3 кВт) через согласующее устройство. Для задания необходимого отрицательного смещения на охлаждаемый электрод-подложкодержатель от отдельного ВЧ генератора (частота 13,56 МГц, мощность до 300 Вт) через согласующее устройство подавалось смещение. Высокотурбомолекулярная система откачки на базе турбомолекулярного и форвакуумного насосов обеспечивала предельный остаточный вакуум $1 \cdot 10^{-3}$ Па.

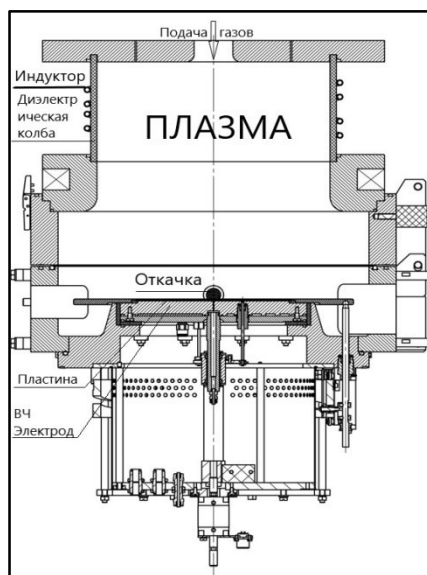


Рис. 2. Схема реактора установки ПЛАЗМА ТМ 200-02К.

Результаты экспериментов

Первоначально эксперименты проводились на пластинах диаметром 200 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 200 мм были проведены эксперименты на пластинах

диаметром 100 мм. Фотографии поверхностей пластин 200 мм и 100 мм под микроскопом приведены на рис.3.

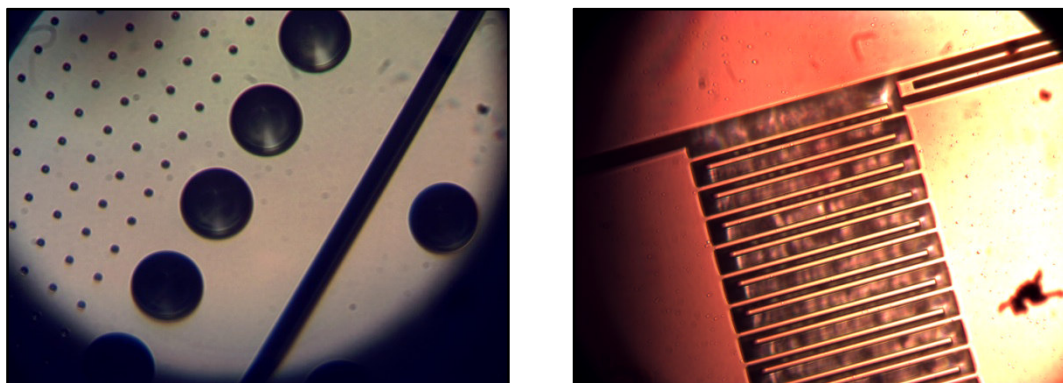


Рис.3. Снимки на микроскопе МИИ-4 пластин 200 мм(слева) и 100 мм(справа).

Для проверки процесса глубокого травления кремния подобран режим со следующими параметрами:

Таблица №1.

| Стадия | Травление 1 | Травление 2 | Пассивация |
|--|-------------|-------------|------------|
| Расход Ar, л/ч | 2 | 2 | 2 |
| Расход SF6, л/ч | 120 | 120 | 0 |
| Расход C4F8, л/ч | 0 | 0 | 80 |
| Давление, Па | 4 | 4 | 3 |
| Мощность источника плазмы, Вт | 1000/36 | 1000/44 | 1200/29 |
| Мощность подложкодержателя, Вт | 90/51 | 40/33 | 8/8 |
| Смещение, В | 147 | 70 | 14 |
| Положение конденсатора источника плазмы грубо, В | 1,8 | 1,8 | 1,8 |
| Положение конденсатора источника плазмы точно, В | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Положение конденсатора подложкодержателя, % | 52,6 | 52,6 | 52,6 |
| Положение конденсатора подложкодержателя, % | 47,2 | 47,2 | 47,2 |
| Время, с | 1,5 | 1,5 | 2-6 |
| Количество циклов | 100-250 | 100-250 | 100-250 |
| Расход гелия под пластиной, л/ч | 0,36 | 0,36 | 0,36 |

Результаты процесса приведены на рис. 4.

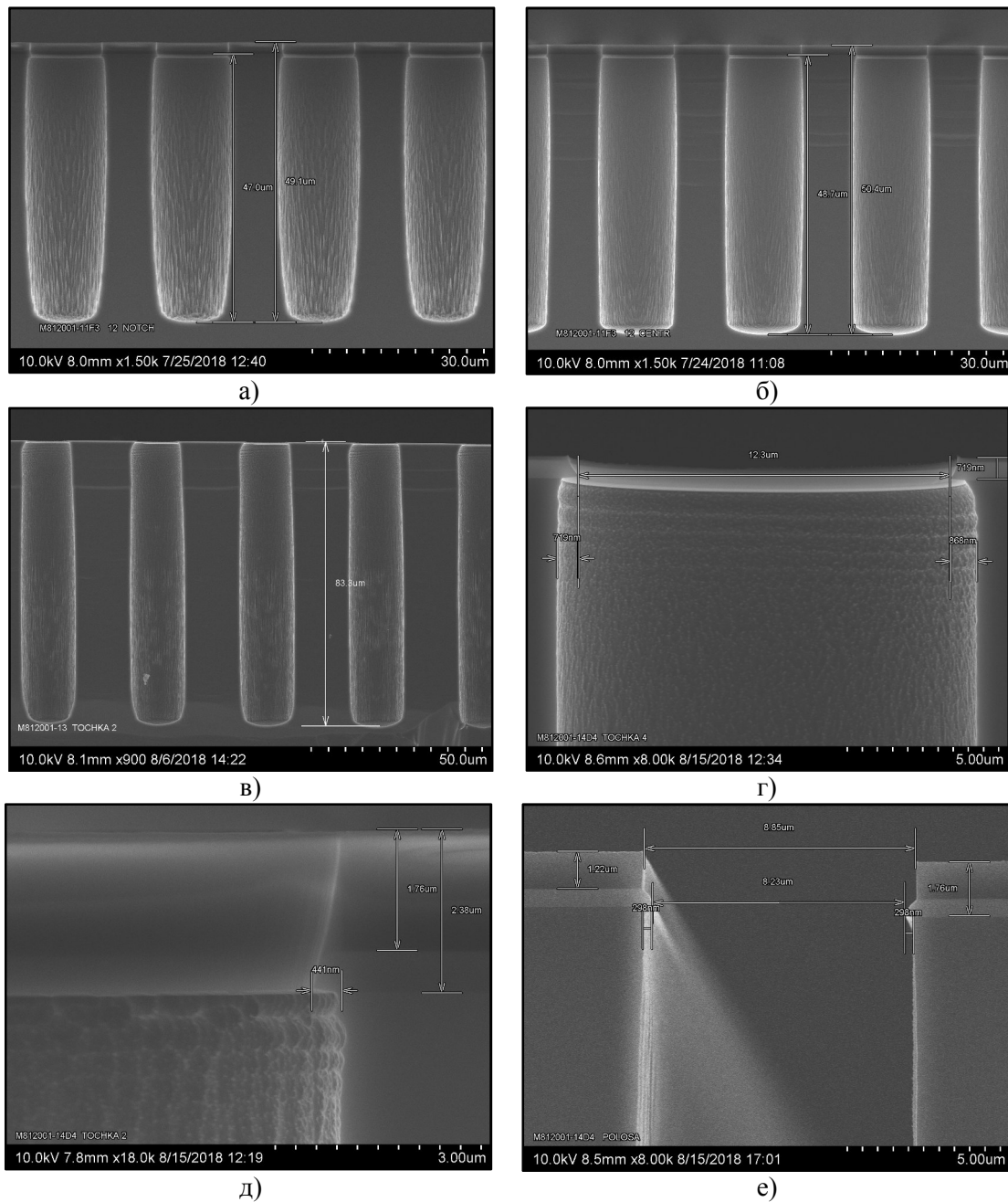


Рис. 4. РЭМ-снимки после операции травления пластин диаметром 200 мм.

Основные характеристики процесса травления:

Средняя скорость травления кремния: $\approx 2,36 \mu\text{м}/\text{мин}$;

Равномерность травления, измеренная в стандартных 5 точках: $\approx 1,77\%$;

Средняя селективность к маске: $\approx 25:1$;

Подтрав под маску: $\approx 286 - 556 \text{ нм}$;

Угол наклона профиля: $\approx 90 \pm 0,5^\circ$;

Величина «scallop» менее 100 нм;

Результаты процесса приведены на рис.5.

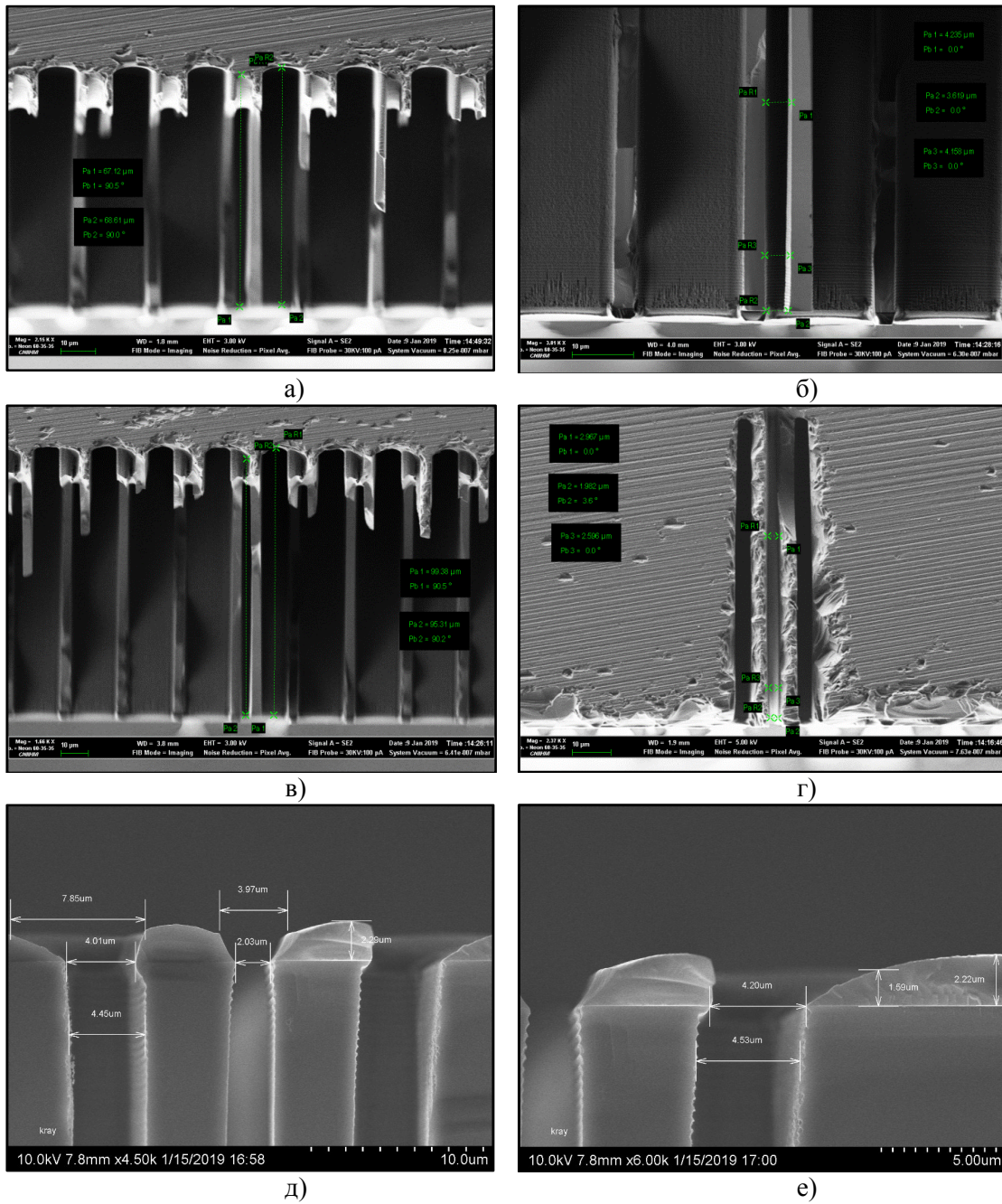


Рис. 5. РЭМ-снимки после операции травления пластин диаметром 100 мм.

Основные характеристики процесса травления:
 Средняя скорость травления кремния: $\approx 5 \text{ мкм/мин}$;
 Равномерность травления, измеренная в стандартных 5 точках: $\approx 1,5\%$;
 Средняя селективность к маске: $\approx 25:1$;
 Подтрав под маску: $\approx 529 \text{ нм}$;
 Угол наклона профиля: $\approx 90 \pm 0,5^\circ$;
 Величина «scallop» менее 132 нм;

Обсуждение результатов травления

Сужение профиля травления, заметное на рис.4 а) связано с избытком полимера на стадии пассивации, об этом же говорит и образование миниатюрных борозд ближе ко дну канавки. Уменьшение полимера позволило выправить профиль травления и избавиться от борозд, однако некая бочкообразность в профиле травления осталась, что видно на рис. 4 б). Для исправления профиля травления было решено разбить стадию травления на два этапа. На первом этапе происходило скоростное удаление полимера со дна отверстия, на втором этапе производилось травление кремния. Это позволило значительно уменьшить бочкообразность, и выправить профиль, что видно на рис. 4 в), где глубина травления в 2 раза больше и профиль травления имеет вертикальное направление.

При полученных скоростях травления (~ 2 мкм/мин) величина подтравы под маску (рис. 4 д) е)) незначительна и не превышает 556нм. Уменьшения подтравы под маску в случае необходимости можно добиться при уменьшении скорости травления.

При травлении щелей (рис. 5) подтрав под маску не превышает 529 нм, несмотря на более высокую скорость травления (~ 5 мкм/мин), что может объясняться различной топологией структур, при этом величина шероховатостей стенок («scallops») увеличивается с увеличением скорости травления, но не превышает 130 нм. Минимальное достигнутое значение шероховатости порядка 75 нм (рис. 4 д)).

Представленные режимы травления, возможно, не являются оптимальными для данных образцов, т.к. в ходе исследования не использовались все технологические возможности установки. Представленные результаты носят информационный характер с целью демонстрации возможностей оборудования.

Выводы

Разработан реактор и установка Плазма ТМ200-02К для формирования углублений в кремнии, с применением «Bosch»-процесса на кремниевых пластинах диаметром до 200 мм.

Получены значения неоднородности процесса травления в пределах 2 – 3 %, глубокие отверстия и щели с большим аспектным соотношением (более 15) и низкой шероховатостью стенок, при скорости травления кремния до 5 мкм/мин, что позволяет применять установку для промышленного производства.

Литература

1. О.П. Гущин, А.С. Валеев, А.А. Чамов, Н.Г. Мицын, В.М. Долгополов, В.В. Одинокоев, В.Э. Немировский, П.А. Иракин, «Исследование и разработка оборудования и технологии глубокого травления кремния», Микроэлектроника-2015. Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение, стр. 561-564.
2. 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.
3. Амиров И.И., Изюмов М.О., Морозов О.В., «Анизотропное травление глубоких канавок в кремнии во фторсодержащей плазме», 2008 год, стр. 653-656.
4. Oxford Plasma Technology, «Deep Si Etching at room temperature: the "Bosch" process» (http://www.oxfordplasma.de/process/sibo_1.htm).
5. Oxford Plasma Technology, «High Rate Bosch Process by ICP Accelerator» (http://www.oxfordplasma.de/process/sibo_acc.htm).
6. 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/>).
7. 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>).