

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАСТИНЫ НА РАВНОМЕРНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ С ЦЕЛЬЮ МОДЕРНИЗАЦИИ УСТАНОВКИ «МВУ ТМ ПЛАЗМА 06»

© А. В. Данила, В. М. Долгополов, П. А. Иракин, В. Э. Немировский,
В. В. Одинокоев, Г. Я. Павлов

ОАО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»,
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский пр-т, 10

В работе представлены результаты исследования влияния термостабилизации подложки на равномерность процесса глубокого травления кремния в реакторе плазмохимического травления российского производства, изготовленного на базе установки «МВУ ТМ Плазма 06», разработанной в ОАО «НИИ Точного Машиностроения». Термостабилизация с помощью тонкого слоя инертной жидкости на основе полифениловых эфиров позволяет получить значения неоднородности процесса травления до 5 % по площади пластины, при этом данный метод может применяться для отработки процессов или пилотных серий новых продуктов. Данный тип жидкостей обладает высокой термической стойкостью и низкой упругостью пара при комнатной температуре. Добавление фтор- и хлор радикалов делает их инертными, что позволяет им сохранять свои свойства в агрессивных средах.

Ключевые слова: глубокое травление кремния, «TSV», «Bosch»-процесс, термостабилизация подложки, «МВУ ТМ Плазма 06»

Сведения об авторах: Данила Андрей Владимирович, doc13.9i@gmail.com; Долгополов Владимир Мионович, к.т.н., step455@mail.ru; Иракин Павел Александрович, irakinp@gmail.com; Немировский Владимир Эдуардович, vlednem@mail.ru; Одинокоев Вадим Васильевич, д.т.н., профессор, vodinokov@niitm.ru; Павлов Георгий Яковлевич, к.ф.-м.н., pavlov@niitm.ru

RESEARCH OF THE EFFECT OF WAFER THERMAL STABILIZATION ON THE DEEP SILICON ETCHING PROCESS UNIFORMITY FOR THE MODERNIZATION OF «MVU TM PLAZMA 06»

A. V. Danila, V. M. Dolgoplov, P. A. Irakin, V. E. Nemirovsky, V. V. Odinkov,
G. Ya. Pavlov

JSC «Research and Scientific Institute of Precision Engineering»,
124460, Moscow, Zelenograd, Panfilovsky prospect, 10

In this paper we present the results of the research of substrate thermal stabilization impact on the uniformity of deep silicon etching process, developed in the chemical plasma etching reactor built on the basis of device «MVU TM PLAZMA 06» produced by «Research Institute of Precision Machine Manufacturing» JSC, Russia. Thermal stabilization with the thin layer of inert polyphenyl ether liquid allows non-uniformity of the etching process up to 5% on wafer surface. Described method could be used in process testing or in production of pilot series of new products. This type of liquids has high thermal resistance and low vapor pressure at room temperature. Addition of fluorine and chlorine radicals makes liquids inert, allowing them to maintain their properties in aggressive environments.

Keywords: deep silicon etching, «TSV», «Bosch»-process, substrate thermal stabilization, «MVU TM Plazma 06»

Data of authors: Danila Andrey Vladimirovich, doc13.9i@gmail.com; Dolgoplov Vladimir Mironovich, Ph.D., step455@mail.ru; Irakin Pavel Aleksandrovich, irakin@gmail.com; Nemirovsky Vladimir Eduardovich, vlednem@mail.ru; Odinkov Vadim Vasilyevich, Sc.D., Professor, vodinokov@niitm.ru; Pavlov Georgy Yakovlevich, Ph.D., pavlov@niitm.ru

Введение

По прогнозам производителей интегральных схем (ИС) на 2020-2025 года физические размеры минимальных элементов КМОП, как ожидается, будут ниже порога 10 нм. Несмотря на разработку перспективных туннельных транзисторов, становится ясно, что фундаментальные геометрические пределы будут достигнуты в короткие сроки. Поэтому сейчас ведутся активные разработки использования вертикальной оси трёхмерного пространства, то есть возможность укладывать стеки транзисторов друг на друга, и этот подход будет продолжать наращивать количество компонентов на квадратный миллиметр, даже если горизонтальный физический размер больше не будет поддаваться дальнейшему масштабированию. Всё больше внимания уделяется процессам 3D интеграции в производстве СБИС, поскольку они обладают огромным потенциалом решения проблем интеграции разнородных систем, с которыми сталкиваются производители СБИС. В зависимости от требований, предъявляемых к системе, используются различные подходы [1].

Система в корпусе (SIP) характеризуется количеством интегральных схем, заключённых в одном корпусе (модуле). SIP выполняет все или большинство функций электронной системы и обычно используется внутри бытовых приборов. Матрицы, содержащие интегральные схемы, могут быть уложены вертикально на подложке. Они могут быть соединены между собой тонкими проводниками, технологией flip-chip или бампов припоя. Например, SIP может содержать несколько чипов, одновременно смонтированных на одной подложке, таких как процессор, память DRAM, флэш-память в сочетании с пассивными компонентами – резистором и конденсатором. Это особенно ценно при ограниченном пространстве, так как уменьшает сложность печатной платы и общий дизайн. Так, формирование 3D стека ИС (3D-SIC) с использованием стандартной методики одинарного дамассцена на объёмном-Si в сочетании с утонением обратной стороны пластины и Cu-Cu термокомпрессионного соединения позволило по-

лучить 104 3D-via (переходное контактное окно) с шагом 10 мкм и диаметром 5 мкм [2].

Система на чипе или система на кристалле (SoC) – это интегральная схема, которая объединяет все компоненты компьютера или другой электронной системы в одном чипе. Она может содержать цифровой, аналоговый и смешанный тип сигналов, и, в частности, радиочастотные функции – все на одном чипе. SoC очень распространены на рынке мобильной электроники из-за их низкого энергопотребления [3].

В основном при изготовлении трёхмерных структур с применением технологии формирования глубоких отверстий в кремнии (through-silicon vias – TSV), а также при изготовлении микроэлектромеханических систем (МЭМС) используют «Bosch»-процесс. Основным недостатком процесса является шероховатость стенок в связи с цикличностью процесса. В настоящее время технология формирования глубоких отверстий в кремнии представляет большой интерес для отечественной микроэлектроники. Однако по программе импортозамещения необходимо промышленное оборудование российского производства. Целью данной работы была разработка реактора российского производства для глубокого травления кремния на основе «Bosch» процесса для технологии производства СБИС.

Методика экспериментов

Эксперименты проводились на пластинах диаметром 100 и 150 мм. На пластинах предварительно были сформированы: слой из оксида кремния толщиной 0,6 мкм в качестве жёсткой маски и топологическая фоторезистивная маска толщиной 2,2 мкм. Топологический рисунок фоторезистивной маски представляет собой матрицу, в узлах которой находятся отверстия диаметрами 2, 3, 5 и 10 мкм, наиболее применяемые в технологии 3D сборки. Для анализа изменения результатов процесса глубинного травления кремния, с целью выявить влияние термостабилизации процесса на равномерность травления кремния по площади пластины, было использовано два типа теплопроводного слоя: минеральное масло на основе кремнийорганической жидкости и тонкий слой инертной жидкости на основе полифениловых эфиров.

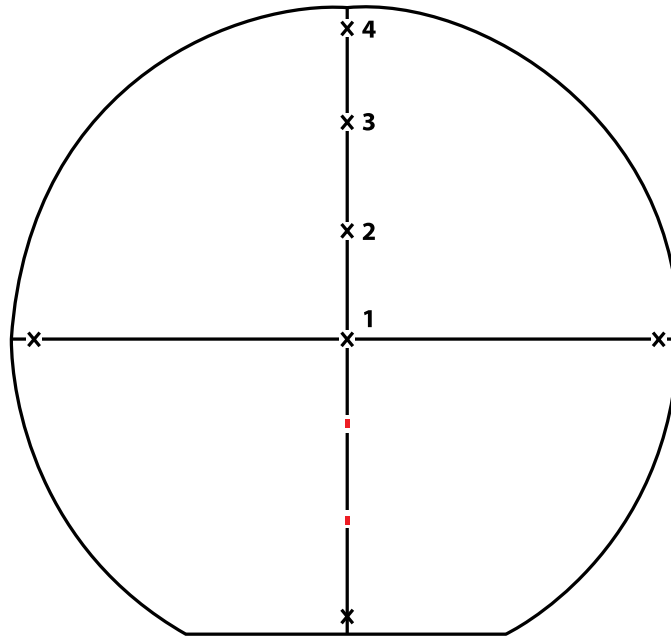


Рис. 1

Точки, в которых измерялась равномерность травления

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

- время процесса: – 15-25 минут;
- температура столика: – 14 °С;
- расходы газов: SF₆ = 100 см³/мин;
C₄F₈ = 67 см³/мин; Ar = 60 см³/мин;
- давление – 9 Па;
- мощность источника – 600 Вт;
- напряжение смещения – 35 В;
- время цикла SF₆/C₄F₈ – 11/4 сек.

Исследование профиля протравленных структур производилось с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

Равномерность травления по площади пластины определялась по пяти точкам (центр и края) и по сечению через центр (точки 1, 2, 3 и 4), как показано на рис. 1.

Описание установки

Отработка реактора и технологии для глубокого травления кремния проводилась на базе установки «МБУ ТМ Плазма 06», разработанной в ОАО «НИИ Точного Машиностроения». Внешний вид установки представлен на рис. 2.

Схема реактора представлена на рис. 3. Разряд зажигается в реакцион-

ной камере (диаметром 180 мм и высотой 100 мм) ICP 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.

Результаты экспериментов

На рис. 4 представлены изображения РЭМ результатов глубокого травления кремния изолированных и плотно расположенных структур при использовании в качестве теплопроводного слоя минерального масла на основе кремнийорганической жидкости. Так на рис. 4 можно наблюдать растрав структуры кремниевого окна в центре из-за растрова жёсткой маски SiO₂, в связи с высокой неоднородностью процесса травления по площади пластины. Известно, что наибольшую опасность



Рис. 2

Установка глубокого анизотропного травления «МВУ ТМ Плазма 06»

представляют хлорсодержащие и фторсодержащие газы, при которых происходит полимеризация минеральных масел, поскольку фторсодержащие продукты менее реакционноспособны вследствие большей прочности связи F-C в сравнении со связью Cl-C, что приводит к деградации теплопроводящих свойств по площади пластины.

Для улучшения условий термостабилизации операции глубокого травления кремния было решено наносить на по-

верхность столика-подложкодержателя тонкий слой инертной жидкости 5ф4-Э на основе полифениловых эфиров. Данный тип жидкости обладает высокой термической стойкостью и низкой упругостью пара при комнатной температуре. Добавление фтор- и хлор-радикалов делает их инертными, что позволяет им сохранять свои свойства в агрессивных средах. Примером жидкости на основе полифениловых эфиров за рубежом является

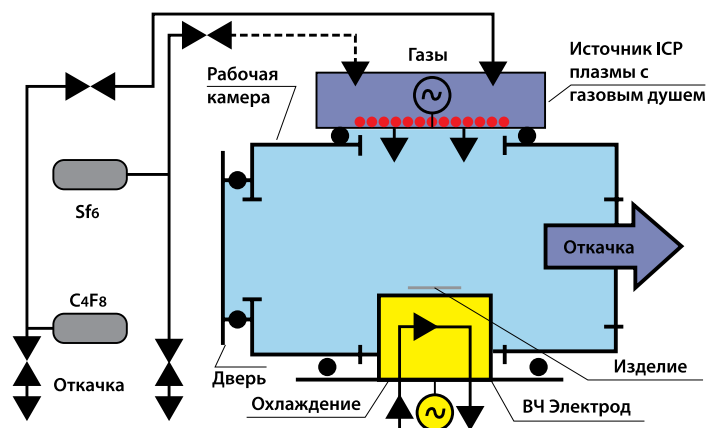


Рис. 3

Схема реактора установки «МВУ ТМ Плазма 06»

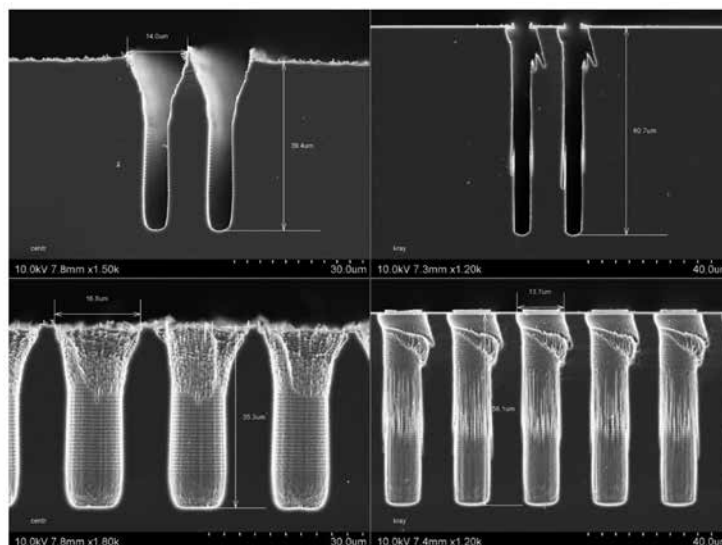


Рис. 4

РЭМ-изображения, характеризующие результаты «Bosch»-процесса при использовании в качестве теплопроводного слоя минерального масла на основе кремнийорганической жидкости.

Время процесса – 20 мин; температура столика – 14 °С;
расходы газов: SF6 = 100 см³/мин; C4F8 = 67 см³/мин; Ar = 60 см³/мин;
давление – 9 Па; мощность источника – 600 Вт; напряжение смещения – 35 В;
время цикла SF6/C4F8 – 11/4 сек

Fomblin. Результаты процесса глубокого травления кремния представлены на рис. 5 и рис. 6. Таким образом, можно констатировать значительные улучшения процесса глубокого травления Si по площади пластины:

– улучшена равномерность травления, отклонение по глубине травления в зависимости от диаметра контактного окна (2, 3, 5, 10 мкм) TSV, соответственно, составляет $3\sigma = 1,06; 0,64; 1,82$ и $2,19$ мкм;

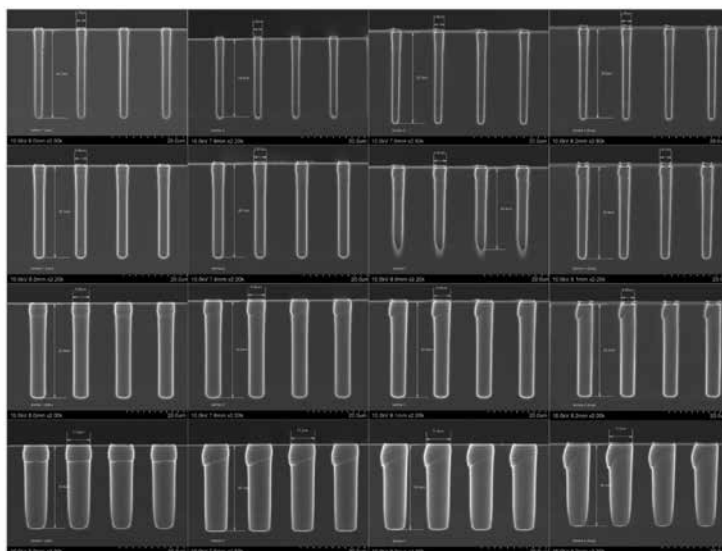


Рис. 5

РЭМ-изображения, характеризующие результаты «Bosch»-процесса при использовании в качестве теплопроводного слоя инертной жидкости на основе полифениловых эфиров.

Время процесса – 15 мин; температура столика – 14 °С; расходы газов: SF6 = 100 см³/мин;
C4F8 = 67 см³/мин; Ar = 60 см³/мин; давление – 9 Па; мощность источника – 600 Вт;
напряжение смещения – 35 В; время цикла SF6/C4F8 – 11/4 сек

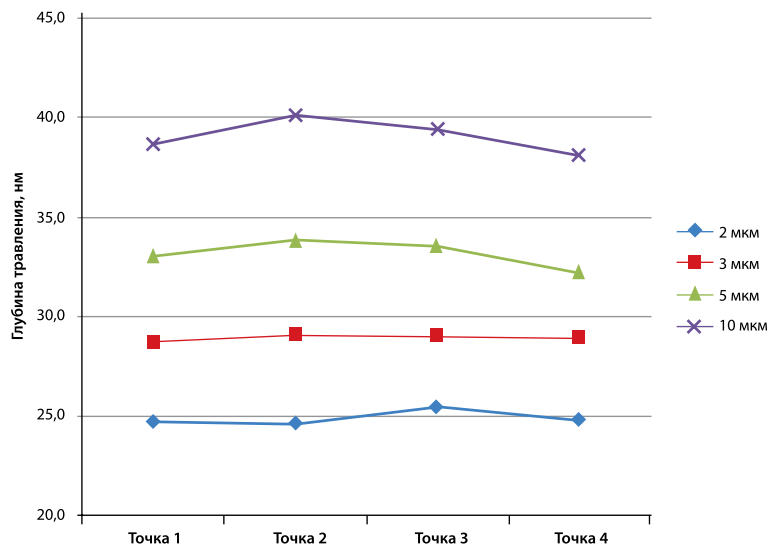


Рис. 6

Зависимость равномерности глубины травления от диаметра топологического рисунка контактного окна TSV

– селективность травления кремния к фоторезисту составляет 33:1.

Поскольку при промышленном изготовлении ИС одним из основных параметров, влияющих на стоимость конечного продукта, является выход годных изделий, который связан с неоднородностью травления по площади пластины, необходима разработка электростатического прижима, который даёт возможность использовать «гелиевое охлаждение». При этом гелий является газом с превосходной теплопроводностью 0,1437 Вт/(м·К) и теплоёмкостью $C_p = 14,23$ кДж/(кг·К). Использование электростатического прижима уменьшает время цикла травления за счёт отсутствия операций, связанных с равномерным нанесением и удалением термостабилизационного слоя инертной жидкости, и позволяет проводить процессы с высокой однородностью от пластины к пластине. С другой стороны, для улучшения однородности процессов по площади пластины желательно изменение конструкции реактора и системы откачки продуктов реакции, так как конструкция реактора должна обеспечивать симметричное радиальное распределение плотности плазмы и удаление продуктов реакции. Описанная выше модернизация конструктивно может быть отражена в радиально-симметричном распределении си-

стемы подачи технологических газов «душевого» типа и системе откачки типа «слив» (откачной коллектор на дне реактора).

Выводы

Исследованный процесс глубокого травления кремния с методом термостабилизации с помощью тонкого слоя инертной жидкости на основе полифениловых эфиров позволяет получить значения неоднородности процесса травления до 5 % по площади пластины, при этом данный метод может применяться для отработки процессов или пилотных серий новых продуктов. Для массового промышленного производства ИС необходима доработка реактора высокоплотной плазмы в части использования электростатического прижима с гелиевым охлаждением.

Литература

1. Arden W., Brillouët M., Coge P., Graef M., Huizing B., Mahnkopf R. More-than-Moore. White Paper. ITRS 2011.
2. Swinnen B., Ruythooren W., P. De Moor, Bogaerts L., Carbonell L., K. De Munck, Eyckens B., Stoukatch S., Sabuncuoglu Tezcan D., Tökei Z., Vaes J., Van Aelst J., Beyne E. 3D integration by Cu-Cu thermo-compression bonding of extremely thinned bulk-Si die containing

- 10 μm pitch through-Si vias // Electron Devices Meeting, 2006. IEDM '06. International.
3. Bennett P. The why, where and what of low-power SoC design // EE Times. December 2, 2004.
- References**
1. Arden W., Brillouët M., Coge P., Graef M., Huizing B., Mahnkopf R. More-than-Moore. White Paper. ITRS 2011.
2. Swinnen B., Ruythooren W., P. De Moor, Bogaerts L., Carbonell L., K. De Munck, Eyckens B., Stoukatch S., Sabuncuoglu Tezcan D., Tökei Z., Vaes J., Van Aelst J., Beyne E. 3D integration by Cu-Cu thermo-compression bonding of extremely thinned bulk-Si die containing 10 μm pitch through-Si vias // Electron Devices Meeting, 2006. IEDM '06. International.
3. Bennett P. The why, where and what of low-power SoC design // EE Times. December 2, 2004.