

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ TSV-ОТВЕРСТИЙ МЕТОДОМ HIPIMS

METALLIZATION OF TSV-HOLES USING HIPIMS METHOD

Д.А.Дудник¹ / danil.dudnik@student.bmstu.ru, А.А.Доломанжи² / alexs-ok@mail.ru
В.В.Панин² / vpanin@niitm.ru, В.В.Одинок² (ORCID: 0000-0000-0000-0003) /
vodinokov@niitm.ru, Р.А.Каракулов¹ (ORCID: 0000-0000-0000-0004) /
ruslankarakulov@yandex.ru

D.A.Dudnik, A.A.Dolomanzhi, V.V.Panin, V.V.Odinokov R.A.Karakulov,

¹МГТУ им. Н. Э. Баумана, г.Москва

²АО Научно-исследовательский институт точного машиностроения, г.Москва

В статье рассматривается металлизация TSV-отверстий методами DC MS и HIPIMS, реализованными на установке Магна ТМ 200-04. Метод HIPIMS позволяет получить качественные покрытия, которые обладают более высокой равномерностью толщины, по сравнению с DC MS.

Ключевые слова: металлизация отверстий, качественные покрытия, высокая равномерность толщины

The article deals with the metallization of TSV holes by DC MS and HIPIMS methods implemented on a Magna TM 200-04 installation. The HIPIMS method allows to obtain high-quality coatings which have a higher thickness uniformity compared to DC MS.

Keywords: metallization of holes, high-quality coatings, higher thickness uniformity.

ВВЕДЕНИЕ

Технология Through Silicon Via (TSV) позволяет осуществлять межсоединения на уровне смонтированных в 3D сборку пластин или кристаллов. В техпроцесс выполнения сквозных переходных отверстий входят операции утонения пластин, глубокого плазменного травления и заполнения переходных отверстий.

Металлизация отверстий TSV реализуется в зависимости от типа проводника. Так, например, для меди рекомендуется метод PVD, для платины – метод атомно-слоевого осаждения (ALD) [1].

На текущий момент наиболее популярными методами физического нанесения покрытий в вакууме является магнетронное распыление при постоянном токе (DC MS) и магнетронное распыление импульсами высокой мощности (HIPIMS). Последнему, в свою очередь, благодаря высокой импульсной плотной мощности на поверхности, характерна высокая концентрация плазмы (до 10^{13} см⁻³) и степень ионизации распыленного вещества (до 90%). Эти свойства делают HIPIMS универсальным методом, объединяющим в себе преимущества дугового испарения и классического магнетронного распыления – возможность формирования высококонцентрированных ионно-плазменных потоков без наличия микрокапель.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Металлизация структуры производилась на установке Магна ТМ 200-04 (рис. 1) ведущего производителя вакуумного оборудования в России АО «НИИТМ». Установка предназначена для нанесения магнетронным распылением алюминиевой (Al) металлизации, формирование адгезионных, барьерных (Ta/TaN, Ti/TiN) и зародышевых

медных (Cu) слоев для перемычек в контактных и переходных отверстиях межслойных соединений и др [2].

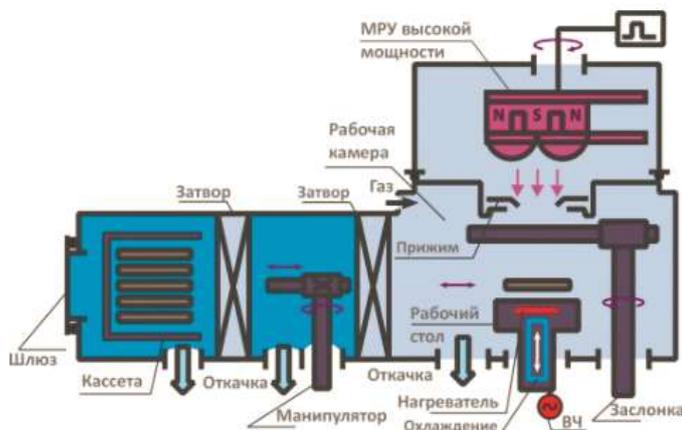


Рис. 1. Схема установка Магна ТМ 200-04.

В ходе исследования были проведены эксперименты по отработке нанесения слоя меди толщиной 1 мкм на пластины с TSV-отверстиями диаметром 10 мкм и глубиной 100 мкм. Цель эксперимента – оценить равномерность толщины покрытий, получаемых методом DC MS и HIPIMS. Установленные параметры процессов приведены в табл. 1,2 соответственно.

Таблица 1.

Параметры процесса DC MS

Мощность DC, Вт	4300
Расстояние между магнетроном и пластиной, мм	86
Мощность ВЧ-смещения, Вт	200
Напряжение смещения, В	75
Уровень отраженной мощности ВЧ-смещения, Вт	3 → 4
Рабочее давление в камере, Па	0,4
Расход аргона, л/ч	0,53
Уровень предварительного вакуума в камере, Па	$3,0 \cdot 10^{-5}$

Продолжение таблицы 1

Время отпыла на заслонку, сек	120
Температура пластины перед напылением, °С	150
Температура пластины в процессе напыления, °С	151
Время процесса, мин:сек	1:00

Таблица 2.

Параметры процесса HIPIMS

Импульсный ток, А	500
Длительность/пауза импульса, мкс	150/2300
Расстояние между магнетроном и пластиной, мм	86
Мощность ВЧ-смещения, Вт	200
Напряжение смещения, В	40
Уровень отраженной мощности ВЧ-смещения, Вт	3 → 162
Рабочее давление в камере, Па	0,4
Расход аргона, л/ч	0,53
Уровень предварительного вакуума в камере, Па	$3,1 \cdot 10^{-5}$
Время отпыла на заслонку, сек	120
Температура пластины перед напылением, °С	150
Температура пластины в процессе напыления, °С	156
Время процесса, мин:сек	2:40

Для исследования и анализа полученных образцов использовался растровый электронный микроскоп с фокусированным ионным пучком FEI Quanta 3D FEG. Более подробное описание устройства представлено на странице производителя [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 изображены TSV-отверстия, покрытые слоем меди двумя методами.

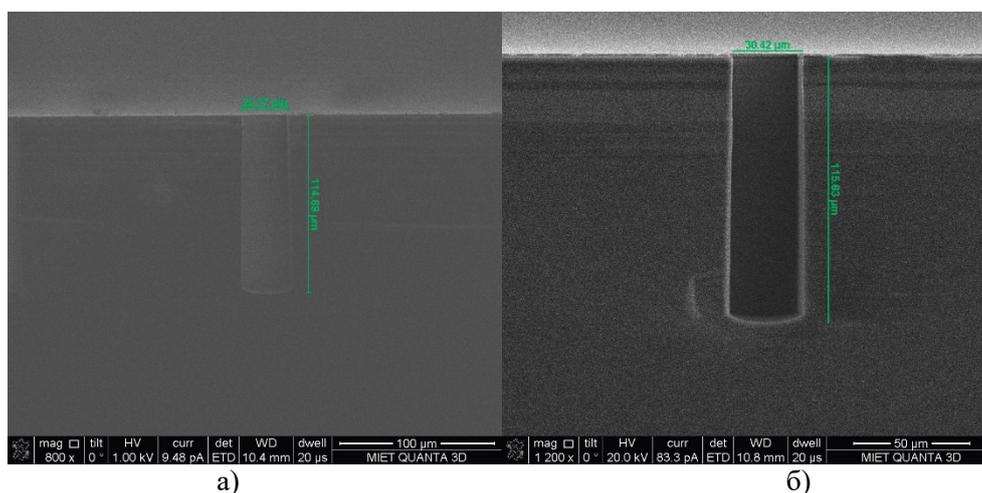


Рис. 2. TSV-отверстия, с нанесенным слоем меди методом: а) HIPIMS; б) DC MS.

При увеличении исследуемого изображения (рис. 3), можно увидеть резкое снижение толщины слоя меди в нижней части образца, полученным методом магнетронного распыления при постоянном токе. В свою очередь, применение импульсов высокой мощности позволило получить качественную металлизацию отверстия.

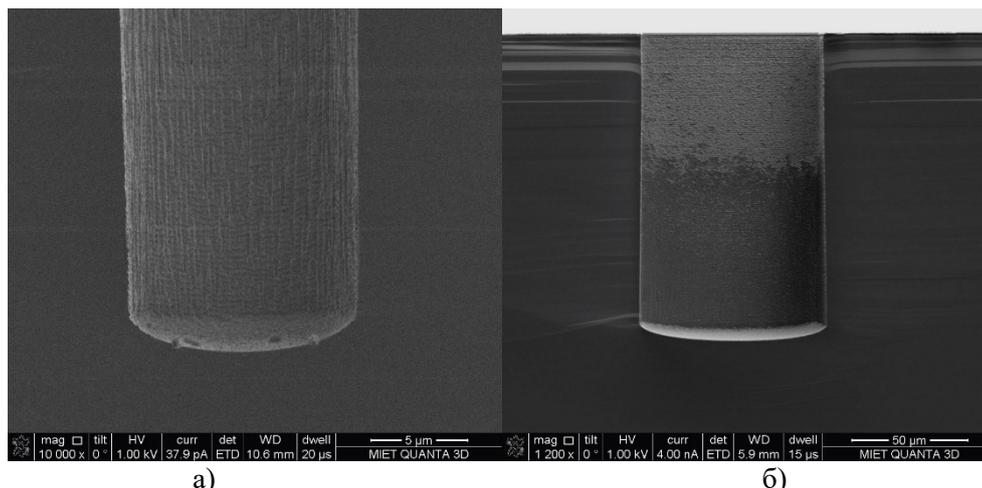


Рис. 3. Увеличенное изображение структур, полученных методом: а) HIPIMS; б) DC MS.

Толщины боковых стенок структур, полученных методом магнетронного распыления при постоянном токе и магнетронным распылением импульсами высокой мощности, в среднем отличаются в 2 раза (рис. 4).

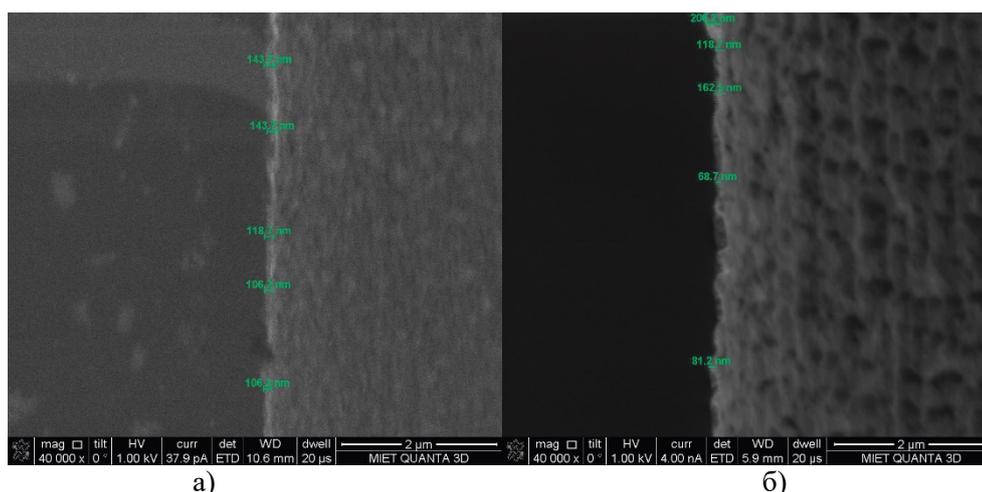


Рис. 4. Боковые стенки структур, полученных методом: а) HIPIMS; б) DC MS.

Для оценки неравномерности слоя меди были выбраны 5 уровней (точек) профиля отверстия:

1. Пластина до отверстия
2. Верхняя часть боковой стенки
3. Средняя часть боковой стенки
4. Нижняя часть боковой стенки
5. Дно отверстия

Интерпретируя полученные измерения графически, легко заметить, что металлизация методом HIPIMS (рис. 5) происходит более плавно, чем методом DC MS (рис. 6). При нанесении методом магнетронного распыления при постоянном токе наблюдается характерный скачок толщины покрытия в точке 5, по сравнению с точкой 4.

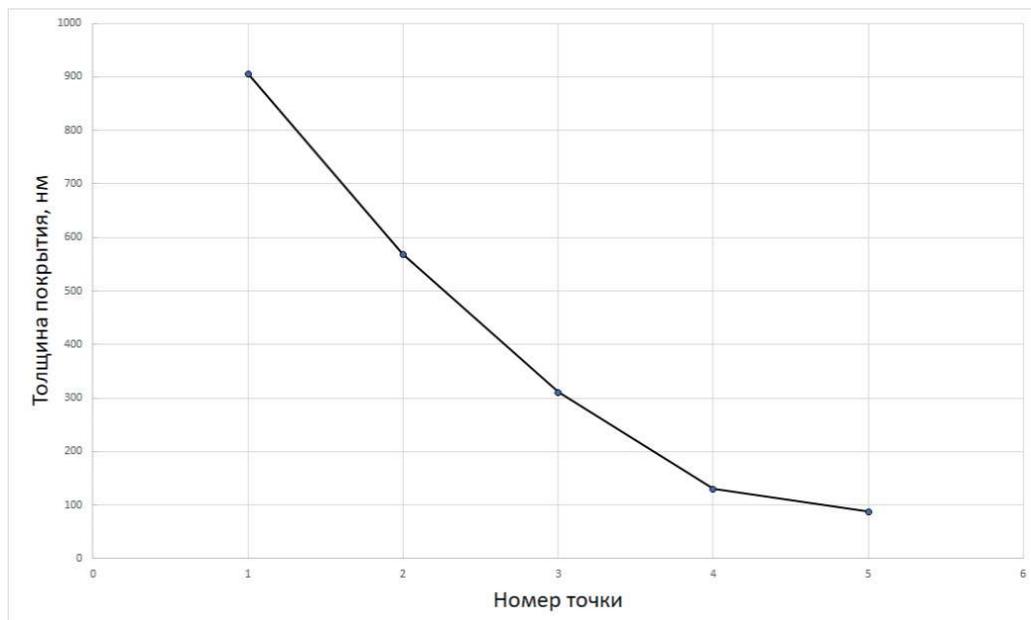


Рис. 5. Графическая интерпретация результатов измерения покрытия, полученного методом HIPIMS.

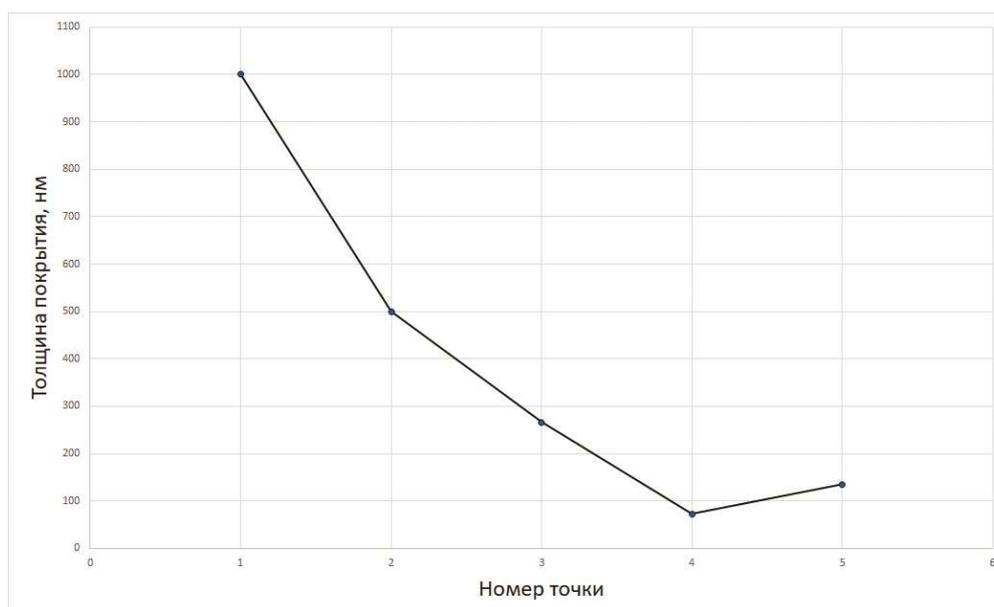


Рис. 6. Графическая интерпретация результатов измерения покрытия, полученного методом DC MS.

ОБСУЖДЕНИЕ

Неравномерная металлизация TSV-отверстия методом магнетронного распыления при постоянном токе объясняется тем, что скорость осаждения покрытия в верхней части структуры (top sidewalls) гораздо выше, чем в средней и нижней (middle, bottom sidewalls). При дальнейшем заполнении отверстия гальваническим осаждением это приведёт к тому, что основная концентрация металла будет сосредоточена в верхней части. Соответственно, значение электропроводности, как основного параметра будущего изделия, не будет находится в пределах нормы.

В это же время, метод магнетронного распыления импульсами высокой мощности, не смотря на более низкую скорость процесса (по сравнению с DC MS),

вызванную эффектом «возвращения» ионизированных атомов обратно на мишень под действием электрического поля, позволяет получить более равномерное покрытие по всей структуре, благодаря высокой степени ионизации атомов материала.

Характерный для магнетронного распыления скачок толщины в нижней точке объясняется тем, что частицы напыляемого материала быстрее осаждаются в плоскость, перпендикулярную оси магнетрона.

ВЫВОДЫ

Использование классического метода магнетронного распыления при постоянном токе для получения качественных TSV-структур является неприоритетным, в связи с высокой неравномерностью получаемого покрытия по всему отверстию.

Метод HIPIMS позволил провести качественную металлизацию TSV-отверстия благодаря своим свойствам, корректно подобранным параметрам и высокотехнологическому оборудованию.

В сравнении с зарубежными источниками [4,5], полученное покрытие обладает более низкой неравномерностью. Удалось избежать скачка толщины в нижней точке, который является характерным для магнетронного распыления, т.к. сниженная скорость металлизации поверхности и корректное аспектное отношение позволяет предотвратить образование такого дефекта. В добавок, из-за повышенной ионной компоненты та часть покрытия, которая осаждается на дно отверстия, частично распыляется и пересаживается на стенки.

Можно считать, что на данный момент, формирование затравочного слоя сквозного переходного отверстия в кремнии методом магнетронного распыления импульсами высокой мощности является наиболее технологичным и экономически выгодным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Burkett S. L. et al. Tutorial on forming through-silicon vias //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2020. – Т. 38. – №. 3. – С. 031202.
2. ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНОК МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ СО ШЛЮЗОВОЙ ЗАГРУЗКОЙ ИЗ КАССЕТЫ В КАССЕТУ МАГНА ТМ 200-04К [Электронный ресурс] /
3. <http://niitm.ru/магна-тм-200-04к/>. Дата доступа: 19.02.2022
4. РЭМ с фокусированным ионным пучком. [Электронный ресурс] / <https://miet.ru/structure/s/1541/e/68016/311>. Дата доступа: 19.02.2022
5. Weichart J. et al. PVD processes in high aspect ratio features by HIPIMS //2009 Society of Vacuum Coaters 505/856–7188 201, 52nd Annual Technical Conference Proceedings. – 2009.
6. Wei T. et al. Optimization and evaluation of sputtering barrier/seed layer in through silicon via for 3-D integration //Tsinghua Science and Technology. – 2014. – Т. 19. – №. 2. – С. 150-160.