

Метод контроля загрязнения поверхности полупроводниковой пластины по изменению шероховатости

А. В. Трухачев, Н. С. Трухачева, М. В. Седнев, Р. М. Алеев

В работе описан метод контроля загрязнения поверхности полупроводниковых пластин на различных этапах производства. Этот метод включает в себя измерение шероховатости поверхности пластины на различных этапах проводимых операций. При этом степень загрязнения контролируемой поверхности определяется по характеру и величине шероховатости.

От наличия или отсутствия загрязнения, а также от его природы и количества зависит качество промежуточных результатов технологического процесса и необходимость выполнения тех или иных технологических операций, что, в свою очередь, напрямую связано с конечными характеристиками фоточувствительных элементов.

Ключевые слова: метод контроля загрязнения, шероховатость поверхности, полупроводниковая пластина.

Ссылка: Трухачев А. В., Трухачева Н. С., Седнев М. В., Алеев Р. М. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 5. С. 364.

Reference: A. V. Trukhachev, N. S. Trukhacheva, M. V. Sednev, and R. M. Aleev, Usp. Prikl. Fiz. **8** (5), 364 (2020).

Введение

В настоящее время при современном развитии микро- и наноэлектроники, ди-

фракционной оптики и нанофотоники размеры загрязнений на поверхности подложек стали сопоставимы с размерами формируемых микро- и наноструктур, что приводит к необходимости строгого контроля степени загрязнения поверхности [1, 2]. Основным источником загрязнений пластин, прошедших химическую очистку и помещённых в рабочую камеру вакуумной установки, являются откачные средства. В процессе работы откачных средств происходит выделение загрязнений органической и неорганической природы и осаждение их на поверхности подложек [3].

Для анализа степени загрязнения поверхности полупроводниковых пластин широко применяются методы экспресс-контроля [4].

Основными из них являются следующие методы: спектроскопии многократно

Трухачев Антон Владимирович¹, инженер-технолог 2 кат.

Трухачева Наталия Сергеевна¹, инженер-технолог 2 кат.

Седнев Михаил Васильевич¹, нач. участка, к.т.н.
Алеев Рафил Мухтарович², гл. конструктор, д.т.н.

¹АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

²АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения».

Россия, 111024, Москва, ул. Авиамоторная, 53.

Статья поступила в редакцию 01 октября 2020 г.

© Трухачев А. В., Трухачева Н. С., Седнев М. В., Алеев Р. М., 2020

нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) [5]; измерения контактной разности потенциалов (КРП); смачиваемости [6, 7], подразделяемые на методы окунания, конденсации, смачиваемости поверхности подложки каплей жидкости; трибометрического контроля [8].

Данные методы обладают как определенными преимуществами, так и существенными недостатками. Одни позволяют контролировать только гидрофобные загрязнения; другие загрязняют поверхность контролируемой подложки остатками жидкости в процессе измерения; третьи ограничены оптическими свойствами материалов подложек и загрязнений, а также возможностью измерения чистоты поверхности подложек только в определенном диапазоне; четвертые являются трудоёмкими и продолжительными.

Предложенный в данной статье метод контроля загрязнения по шероховатости отличается простотой и надежностью; не несет в себе угрозы дополнительного загрязнения; не ограничен оптическими свойствами материала подложек.

Для разработки упрощенного и ускоренного метода контроля загрязнения поверхности полупроводниковых пластин на различных этапах производства был использован известный ранее профилометрический метод.

Прежде профилометрический метод использовался для измерения профиля или шероховатости пластины, не рассматривая связь этих параметров с наличием и отсутствием загрязнения на ее поверхности. Но благодаря обнаруженной зависимости между изменениями параметров шероховатости и наличием загрязнений на поверхности полупроводниковой пластины, стало возможным новое применение указанного метода.

Техника выполнения метода

Согласно стандарту ГОСТ 2789–73 под шероховатостью поверхности понимают

совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенную с помощью базовой длины.

Базовую длину стандарт определяет как длину базовой линии, используемой для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности. Базовая линия имеет идеальную геометрическую форму, соответствующую номинальному профилю рассматриваемой поверхности. Она может быть прямой, дугой окружности или иметь иную форму, которая определяется нормальным сечением номинальной поверхности плоскостью. Шероховатость поверхности описывают характеристиками и параметрами микро-неровностей профиля, получаемого путем сечения реальной поверхности плоскостью, направленной по нормали к ней. В случае, когда к реальной поверхности может быть проведено множество нормальных секущих плоскостей, выбирают сечение, имеющее максимальные параметры шероховатости, если направление измерения шероховатости не оговорено специально.

В работе [9] приведены 23 параметра шероховатости, однако на практике, как правило, чаще всего применяются R_z и R_a .

R_z – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины; R_a – среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины.

Существует большое количество методов измерения параметров шероховатости [10–18].

В основном все они делятся на две группы:

1) методы, основанные на дифракции электромагнитного излучения на неоднородной границе раздела сред (оптические и рентгеновские):

- метод светового сечения;
- растровый метод;
- рефлектометрический метод;

– метод слепков;
– метод сравнения с образцовой деталью;

– интерференционный метод;

2) прямые методы контроля микро рельефа:

– механическая профилометрия;

– атомно-силовая и туннельная микроскопия.

Каждому из методов измерения шероховатости поверхности присущи свои особенности, и выбор того или иного метода должен определяться конкретными задачами. Но наиболее точными являются прямые методы – профилометрические.

Суть профилометрического метода заключается в следующем [12, 15, 18]:

– По исследуемой поверхности перемещается специальная алмазная игла, колеблющаяся от неровностей поверхности. Такие колебания иглы передаются на датчик, где преобразуются в малые электрические токи, которые в свою очередь усиливаются и регистрируются. Показания выводятся на дисплей прибора и дают

представление о характере неровностей исследуемой поверхности – их высоте и глубине.

– При измерении шероховатости поверхности полупроводниковой пластины с помощью профилометра можно определить степень загрязнения поверхности и принять своевременные меры по ее устранению для проведения последующих процессов.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Рассмотрим применение предлагаемого профилометрического метода контроля загрязнения на конкретном примере: прохождения по технологическому маршруту пластины – эпитаксиальной структуры, выращенной на сапфире. Все измерения шероховатости поверхности проводились с длиной базы 100 мкм, измерение профиля поверхности – с длиной базы 48 мм. Полученные данные представлены в таблице и на рисунке.

Таблица

Результаты измерений шероховатости

№ измерения шероховатости	Название операции	Параметры процесса и значения шероховатости
		Измерение профиля поверхности (Длина базы 48000 мкм)
1	Измерение шероховатости поверхности, нм	$R_a = 0,8$ (0,76; 0,78; 0,83) $R_z = 6,2$ (6,15; 6,21; 6,17)
	Обработка в органических растворителях	ИПС-3 мин
2	Измерение шероховатости, нм	$R_a = 0,6$ (0,62; 0,57; 0,62) $R_z = 3,7$ (3,69; 3,69; 3,72)
	ПХТ Мо	4 мин 10 сек. 200 Вт $CF_4:O_2 = 45:10$
3	Измерение шероховатости, нм	$R_a = 0,8$ (0,79; 0,78; 0,81) $R_z = 4,8$ (4,79; 4,82; 4,8)
	ПХТ фоторезиста	5 мин, O_2
4	Измерение шероховатости, нм	$R_a = 0,9$ (0,88; 0,94; 0,85) $R_z = 6,0$ (6,0; 6,0; 5,9)
	Обработка проявителем	КОН 0,25 % 6 сек
5	Измерение шероховатости поверхности, нм	$R_a = 0,6$ (0,59; 0,58; 0,63) $R_z = 3,7$ (3,71; 3,68; 3,71)
	Обработка в органических растворителях	ИПС-3 мин
6	Измерение шероховатости, нм	$R_a = 0,7$ (0,7; 0,69; 0,71) $R_z = 5,2$ (5,2; 5,21; 5,18)
	ПХТ Мо	4 мин 10 сек. 200 Вт $CF_4:O_2 = 45:10$

Окончание таблицы

№ измерения шероховатости	Название операции	Параметры процесса и значения шероховатости
		Измерение профиля поверхности (Длина базы 48000 мкм)
7	Измерение шероховатости, нм	$R_a = 1,0$ (0,99; 1,01; 0,98) $R_z = 7,6$ (7,55; 7,63; 7,61)
	ПХТ фоторезиста	5 мин, O_2
8	Измерение шероховатости, нм	$R_a = 1,2$ (1,12; 1,2; 1,25) $R_z = 6,8$ (6,81; 6,79; 6,82)
	Обработка проявителем	КОН 0,25 % 6 сек
9	Измерение шероховатости поверхности, нм	$R_a = 0,6$ (0,62; 0,59; 0,61) $R_z = 3,7$ (3,69; 3,71; 3,7)
	Обработка в органических растворителях	ИПС-3 мин
10	Измерение шероховатости, нм	$R_a = 0,7$ (0,65; 0,72; 0,66) $R_z = 4,6$ (4,6; 4,59; 4,57)
	Загрузка в Addax (без поджига плазмы)	4 мин
11	Измерение шероховатости, нм	$R_a = 0,7$ (0,71; 0,67; 0,72) $R_z = 5,0$ (4,9; 4,95; 5,02)
	Загрузка в Плазмоком	5 мин
12	Измерение шероховатости, нм	$R_a = 0,7$ (0,71; 0,68; 0,69) $R_z = 4,5$ (4,48; 4,53; 4,54)
	Отмывка пластины	ДМФ 3 р × 3 мин + H_2O
13	Измерение шероховатости поверхности, нм	$R_a = 0,7$ (0,68; 0,71; 0,69) $R_z = 3,9$ (3,92; 3,89; 3,93)
	ПХТ Мо	4 мин 10 сек. 200 Вт $CF_4:O_2 = 45:10$
14	Измерение шероховатости, нм	$R_a = 0,9$ (0,92; 0,86; 0,89) $R_z = 6,6$ (6,57; 6,63; 6,58)
	ПХТ фоторезиста	5 мин, O_2
15	Измерение шероховатости, нм	$R_a = 1,0$ (0,99; 1,02; 0,99) $R_z = 5,8$ (5,79; 5,82; 5,83)

* Измерения в скобках – три выполненных измерения; сразу за знаком равенства – среднее значение.

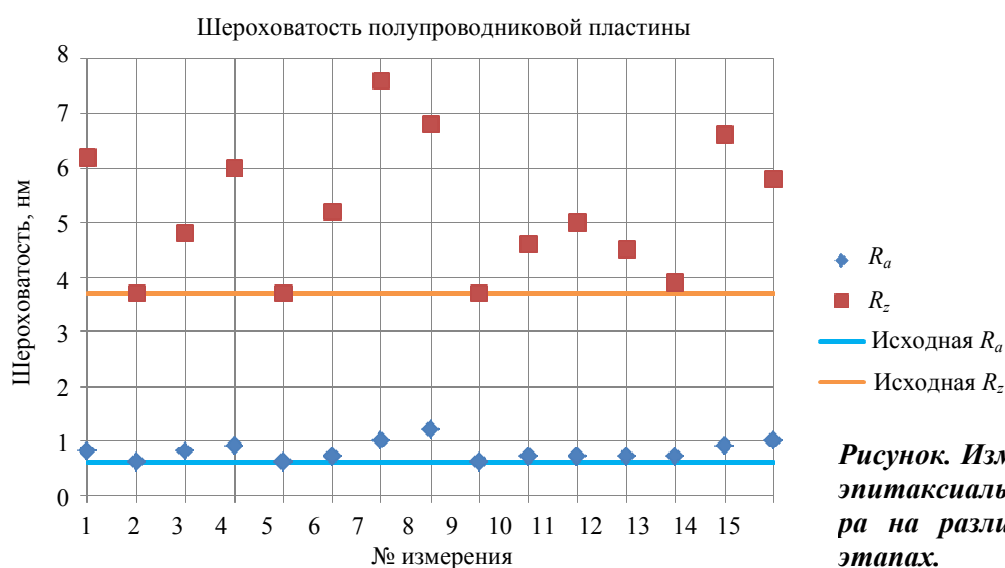


Рисунок. Измерение шероховатости эпитаксиальной структуры сапфира на различных технологических этапах.

Шероховатость сапфира уменьшается после обработки в ИПС, затем растет после плазмохимического травления (ПХТ) молибдена (Mo) и ПХТ фоторезиста, далее падает после обработки проявителем (этап 5), и снова растет на последующих этапах (повторной обработки в ИПС, ПХТ Mo и ПХТ фоторезиста). После повторной обработки проявителем (этап 9) шероховатость пластины возвращается к исходной, а далее увеличивается после ПХТ Mo и ПХТ фоторезиста. Стоит отметить, что на 8 и 12 этапах (ПХТ фоторезиста) при росте шероховатости R_a у пластины наблюдается уменьшение шероховатости R_z . После обработки пластины в ДМФ шероховатость незначительно уменьшается, а затем снова возрастает после ПХТ Mo и ПХТ фоторезиста.

Выводы

Разработанный метод предназначен для контроля загрязнения поверхности полупроводниковых пластин на различных этапах производства. Он включает в себя измерение шероховатости поверхности пластины на различных технологических этапах. При этом степень загрязнения контролируемой поверхности определяется по изменению величины шероховатости.

Преимуществами данного метода являются его простота и скорость контроля загрязнения поверхности полупроводниковых пластин на различных этапах производства, что позволяет на любом этапе заметить загрязнение и принять своевременные меры для его устранения. Использование эффективного метода экспресс-контроля полупроводниковых пластин значительно упрощает работу, повышает вероятность получения ожидаемого результата в конце технологического маршрута и является необходимым условием для серийного выпуска изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Golovashkin D. L., Kazanskiy N. L., Soifer V. A., Pavelyev V. S., Solovyev V. S., Usplenyev G. V., Volkov A. V. *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements*. – John Wiley & Sons, Inc., 2002, pp. 267–345.
2. Казанский Н. Л. // Компьютерная оптика. 2006. № 29. С. 58.
3. Казанский Н. Л., Колпаков В. А., Кричевский С. В. // Компьютерная оптика. 2005. № 28. С. 80.
4. Полтавцев Ю. Г., Князев А. С. *Технология обработки поверхности в микроэлектронике*. – Киев: Техника, 1990.
5. Харрик Н. *Спектроскопия внутреннего отражения / пер. с англ.* – М.: Мир, 1970.
6. Бородин С. А. // Компьютерная оптика. 2006. № 28. С. 66.
7. Бородин С. А., Волков А. В., Казанский Н. Л. // Компьютерная оптика. 2005. № 28. С. 70.
8. Казанский Н. Л., Колпаков В. А., Колпаков А. И., Кричевский С. В., Ивлиев Н. А. // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 1. С. 42.
9. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
10. Уайтхауз Д. *Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы*. – Долгопрудный: Интеллект, 2009.
11. Невлюдов И. Ш., Жарикова И. В., Перепелица И. Д., Резниченко А. Г. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2/5 (68). С. 25.
12. Егоров В. А. *Оптические и щуповые приборы для измерения шероховатости поверхности*. – М.: Машиностроение, 1965.
13. Никифорова А. Д. *Взаимозаменяемость, стандартизация и технологические измерения*. – М.: Высш. шк., 2000.
14. Клепиков В. В., Порошин В. В., Голов В. А. *Качество изделий*. – М.: МГИУ, 2005.
15. Дунин-Барковский И. В., Карташова А. Н. *Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности*. – М.: Машиностроение, 1978.
16. Чекмарев А. А., Осипов В. К. *Справочник по машиностроительному черчению*. – М.: Высш. шк., 2005.
17. Кован В. М., Корсаков В. С., Косилова А. Г. *Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. Изд. 3-е, доп. и перераб.* – М.: Машиностроение, 1977.
18. Бурицев В. М., Васильев А. С., Дальский А. М. и др. *Технология машиностроения: в 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. Изд. 2-е, стереотип.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.

Method for monitoring contamination of the semiconductor surface wafer by measuring the roughness

A. V. Trukhachev¹, N. S. Trukhacheva¹, M. V. Sednev¹, and R. M. Aleev²

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

² JC “RPC “PSI”
53 Aviamotornaya st., Moscow, 111024, Russia

Received October 01, 2020

The paper describes the method for monitoring contamination of the semiconductor surface wafer which was developed by us. The method includes measuring the roughness of the surface wafer at various stages of production. In this case, the surface contamination is determined by the nature and value of roughness.

Keywords: method for monitoring contamination, surface roughness, semiconductor wafer.

REFERENCES

1. D. L. Golovashkin, N. L. Kazanskiy, V. A. Soifer, V. S. Pavelyev, V. S. Solovyev, G. V. Usplenyev, and A. V. Volkov, *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements* (John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 2002), pp. 267–345.
2. N. L. Kazanskiy, *Computer optics*, No. 29, 58 (2006).
3. N. L. Kazanskiy et al., *Computer optics*, No. 28, 80 (2005).
4. Y. G. Poltavcev, *Surface treatment technology in microelectronics* (Technics, Kiev, 1990).
5. N. Harrick, *Internal reflection spectroscopy* (Mir, Moscow, 1970).
6. S. A. Borodin, *Computer optics*, No. 28, 66 (2006).
7. S. A. Borodin, A. V. Volkov, and N. L. Kazanskiy, *Computer optics*, No. 28, 70 (2005).
8. N. L. Kazanskiy, V. A. Kolpakov, and A. I. Kolpakov, *Computer optics* **31** (1), 42 (2007).
9. GOST 2789–73. Surface roughness.
10. D. Whitehouse, *Surface metrology* (Intellect, Dolgoprudny, 2009).
11. I. S. Nevludov, I. V. Zharikova, I. D. Perepelica, and I. G. Reznichenko, *East-European magazine*, No. 2/5 (68), 25 (2014).
12. V. A. Egorov, *Optical and probe instruments for measuring of surface roughness* (Mashinostroenie, Moscow, 1965).
13. A. D. Nikiforov, *Interchangeability, standardization and technological measurements* (High school, Moscow, 2000).
14. V. V. Klepikov, V. V. Poroshin, and V. A. Golov, *Product quality* (MGIU, Moscow, 2005).
15. I. V. Dunin-Barkovsky et al., *Measurements and roughness analysis* (Mashinostroenie, Moscow, 1978).
16. A. A. Chekmarev and V. K. Osipov, *Drawing reference* (High school, Moscow, 2005).
17. V. S. Korsakov, *Fundamentals of mechanical engineering technology* (Mashinostroenie, Moscow, 1977).
18. V. M. Burcev, A. S. Vasilyev, and A. S. Dalskiy, *Mechanical engineering technology* (BMSTU, Moscow, 2001).