

ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДА КОНТАКТНОЙ ПРОФИЛОМЕТРИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЕРЕПАДА ВЫСОТ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ

Дедкова А.А., Киреев В.Ю., Махиборода М.А.

dedkova@ckp-miet.ru, valerikireev@mail.ru, m.makhiboroda@gmail.com

*Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»*

Поступила 12.07. 2020

В работе на конкретных примерах показаны возможности и ограничения метода контактной профилометрии при измерении рельефа микро и наноструктур, формируемых на подложках в процессе производства микроэлектронных приборов. Сформулированы требования к параметрам рельефа микроэлектронных структур, позволяющие использовать для их измерения и контроля контактные профилометры. Приведены способы формирования ступенек для измерения толщины пленок методом контактной профилометрии, проанализированы их преимущества и недостатки. Проведено сравнение метода контактной профилометрии с оптической профилометрией и атомно-силовой микроскопией.

Ключевые слова: рельеф поверхности, перепад высот, контактная профилометрия, контактный профилометр, контроль толщины слоя, поверхность, определение высоты ступеньки

УДК 53.083.98

DOI: 10.31145/2224-8412-2020-20--2-23-40

Введение

В настоящее время важность достоверного измерения рельефа микро- и наноструктур, используемых в интегральных микросхемах (ИМС) и микроэлектромеханических системах (МЭМС), не вызывает сомнений. Путем использования различных контрольно-измерительных методик и приборов совместно с математическим моделированием можно измерить, математически описать и рассчитать рельеф или высоту соответствующей структуры,

определив их оптимальные параметры для получения требуемых характеристик конечного устройства [1].

При этом на этапе воплощения рассчитанной и смоделированной разработчиком структуры в реальное изделие необходимо тщательно контролировать все параметры топологического рельефа получаемой в технологическом процессе структуры, поскольку даже небольшое их отклонение от требуемых значений может привести к неработоспособности конечного прибора.

На всех изделиях проводится контроль высоты и/или профиля полученных элементов ИМС и МЭМС для оценки их соответствия требованиям технического задания. Определение перепада высот топологических элементов ИМС и МЭМС может быть связано с контролем значений и распределения по поверхности пластины толщины, формируемых функциональных слоев, а также уровня неравномерности изменения их толщины на операциях травления и планаризации.

Другим часто встречающимся случаем является определение толщины функциональных слоев [2] при отработке режима операций их нанесения. На измеряемых образцах (пластинах) с этой целью создаются специальные области без нанесенного слоя, и по перепаду высот оценивается толщина нанесенного слоя, а при определении перепадов высот в различных областях по пластине – равномерность операции нанесения.

Выбор метода измерения перепада высот и оборудования для его реализации оказывает большое влияние на результаты измерений и их стабильность. По этой причине разработчики ИМС и МЭМС должны иметь представление об основных возможностях и ограничениях наиболее широко используемого в производственных условиях метода контактной профилометрии.

Основные особенности метода контактной профилометрии

Метод контактной профилометрии и первый прибор (контактный профилометр) для его реализации были изобретены в США в 1933 году (Аббот и Ф. Файерсон [3, 4]). Затем приборы стали выпускаться в Германии, Англии и Японии. В СССР на московском заводе «Калибр» производство профилографов-профилометров началось в 50-х годах 20-го века [5].

Профилографами называют приборы для записей неровностей поверхности, а профилометрами – приборы, позволяющие не только осуществлять запись, но и определять численные значения параметров рельефа [6].

Метод контактной профилометрии часто называют зондовым или «щуповым» методом, поскольку он основан на ощупывании поверхности исследуемого образца зондом (иглой, стилусом).

Профиль поверхности – это линия пересечения исследуемой поверхности с плоскостью, перпендикулярной этой поверхности (рис. 1).

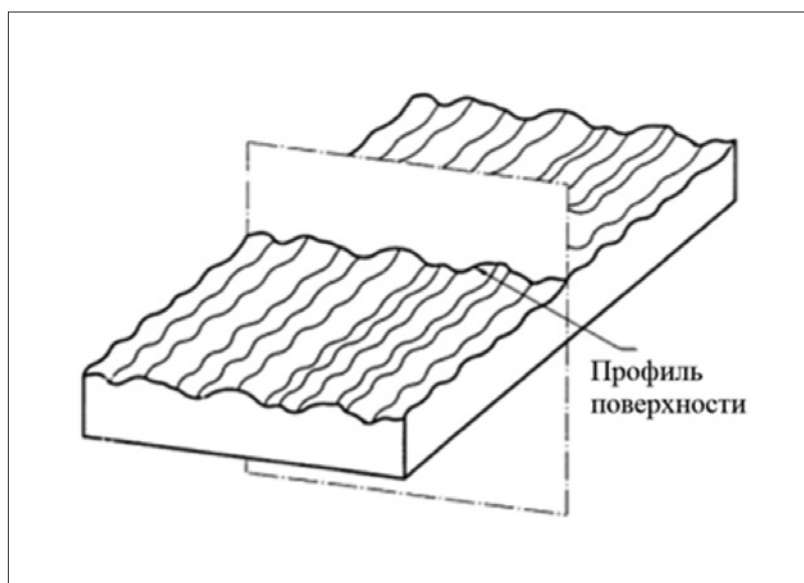


Рис. 1. Профиль поверхности [5]

Метод контактной профилометрии заключается в измерении профиля поверхности исследуемого образца контактно-механическим способом. Основным чувствительным элементом профилометра является зонд (игла, стилус) с острием конической формы. Измеряемая поверхность должна располагаться горизонтально, и на неё под некоторым давлением опускается зонд вплоть до механического соприкосновения острия с поверхностью.

Процесс измерения состоит в перемещении зонда в горизонтальном направлении. При этом зонд, постоянно находясь в контакте с измеряемой поверхностью и следуя за её рельефом, перемещается и в вертикальном направлении. Это перемещение фиксируется с помощью высокочувствительного датчика и записывается в память компьютера.

При анализе поверхности следует учитывать наличие на исходных поверхностях подложек (пластин) неровностей различного вида и уровня размеров: шероховатость, волнистость и др. (рис. 2).

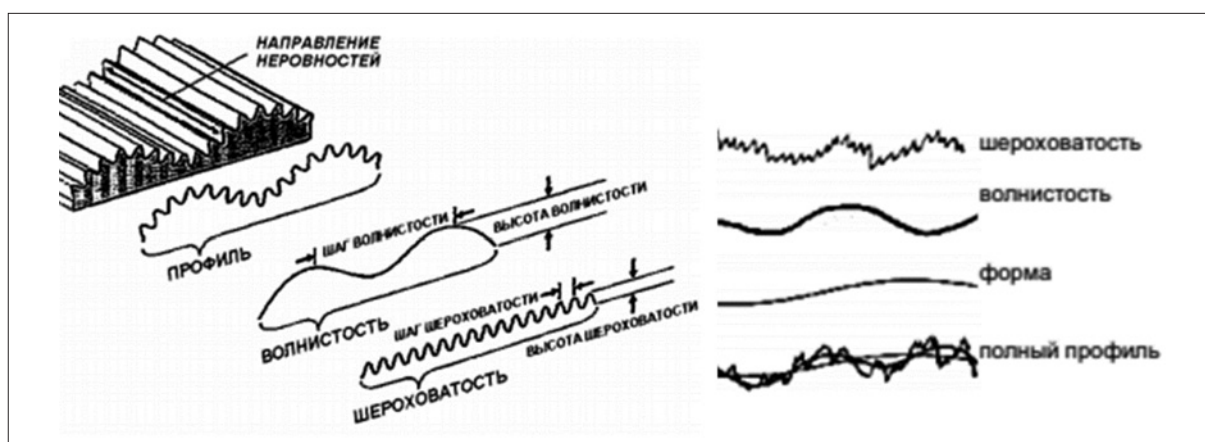


Рис. 2. Шероховатость и волнистость на профиле поверхности [5]

При анализе параметров поверхности обычно проводится серия измерений. В идеальном случае максимальное и минимальное значения искомой величины отбрасываются, а за измеренную величину перепада высот принимается среднее значение $\langle H \rangle$ оставшихся измеренных значений H_i , рассчитываемое по формуле:

$$\langle H \rangle = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N H_i \quad (1)$$

где N – количество измерений в серии.

Поскольку зонд представляет собой остро заточенную иглу, приводимую в поступательное движение по определенной траектории относительно исследуемой поверхности, то точность и ограничения метода контактной профилометрии во многом определяются параметрами используемого зонда. В случае близко расположенных микронеровностей зонд профилометра, скользя по их вершинам, будет передавать только общий контур рельефа (рис. 3).

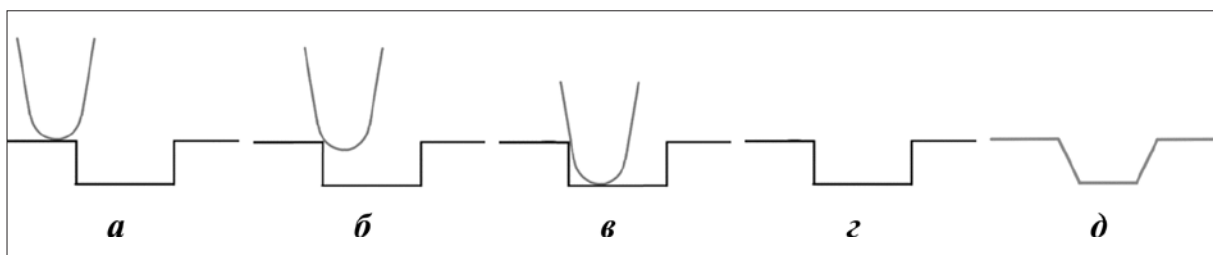


Рис. 3. Движение зонда по профилю (*а, б, в*) и сравнение реального профиля (*г*) с профилем, полученным в результате измерения контактным профилометром (*д*)

С точки зрения геометрии погружения острого зонда [7] в канавку на поверхности образца можно выделять два предельных варианта, представленных на рис. 4.

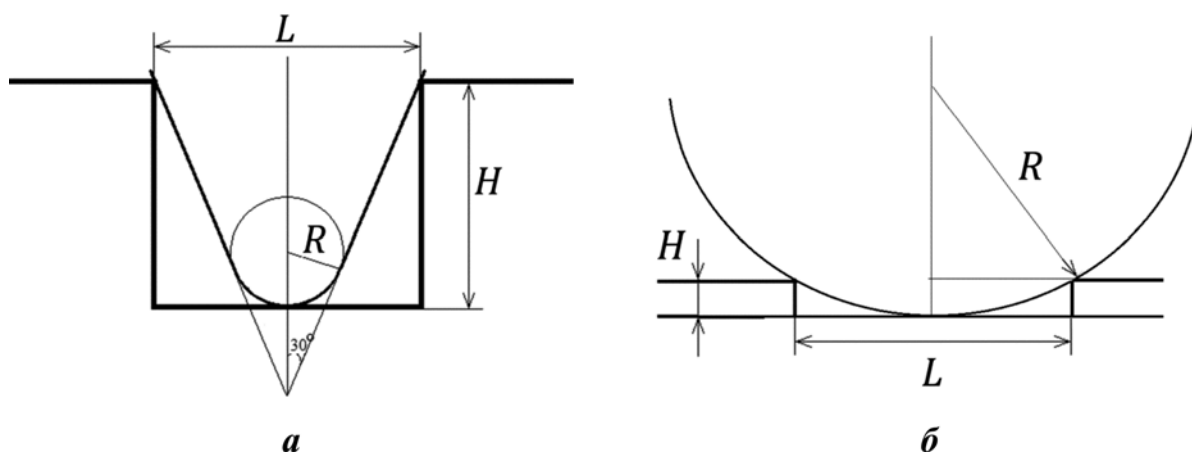


Рис. 4. Предельные случаи расположения зонда контактного профилометра при определении перепада высот: *а* – погружение острого зонда в канавку, *б* – погружение только кончика зонда в канавку

При погружении острия такого зонда в канавку (рис. 4, *a*) максимальная доступная для измерения глубина канавки составляет:

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2}L - R, \quad (2)$$

где H – глубина канавки или перепад высот рельефа поверхности; R – радиус скругления зонда; L – ширина канавки (латеральный размер углубления).

Когда погружен только кончик острия зонда в канавку (рис. 4, *b*), максимальная доступная для измерения глубина канавки составляет:

$$H = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

В случае если контактным профилометром проводятся измерения перепада высот, превышающие значения H , на итоговом профиле будут представлены только данные, определенные с учетом данной геометрии зонда и исследуемой структуры. Эту особенность важно учитывать при контроле перепада высот, поскольку при исследовании структур с малой шириной канавки могут быть получены существенно заниженные значения перепада высот (глубины канавки).

Другой важный аспект, который следует учитывать при работе с контактным профилометром – это возможный диапазон проведения измерений, ограниченный возможностями перемещения зонда. При попытке проведения измерений в областях образца, перепад высот в которых превышает диапазон, указанный в технических характеристиках используемого профилометра, в этих областях данные с контактного профилометра будут зафиксированы некорректно.

Также в качестве отдельного недостатка метода можно выделить сложность, а в некоторых случаях и невозможность работы с мягкими пластичными материалами, в связи с возможностью повреждения (продавливания или царапания) их поверхности зондом при механическом воздействии.

Отдельно следует отметить необходимость проведения процедуры корректировки для выравнивания профиля поверхности измеряемого образца (изделия). Как ранее уже упоминалось, в подавляющем большинстве случаев присутствуют макроотклонения формы поверхности любого изделия от горизонтальной плоскости. Вне зависимости от марки используемого профилометра (в т.ч. это применимо и для оптических профилометров), необходимо проводить процедуру корректировки, и только после этого можно определять перепады высот (рис. 5).

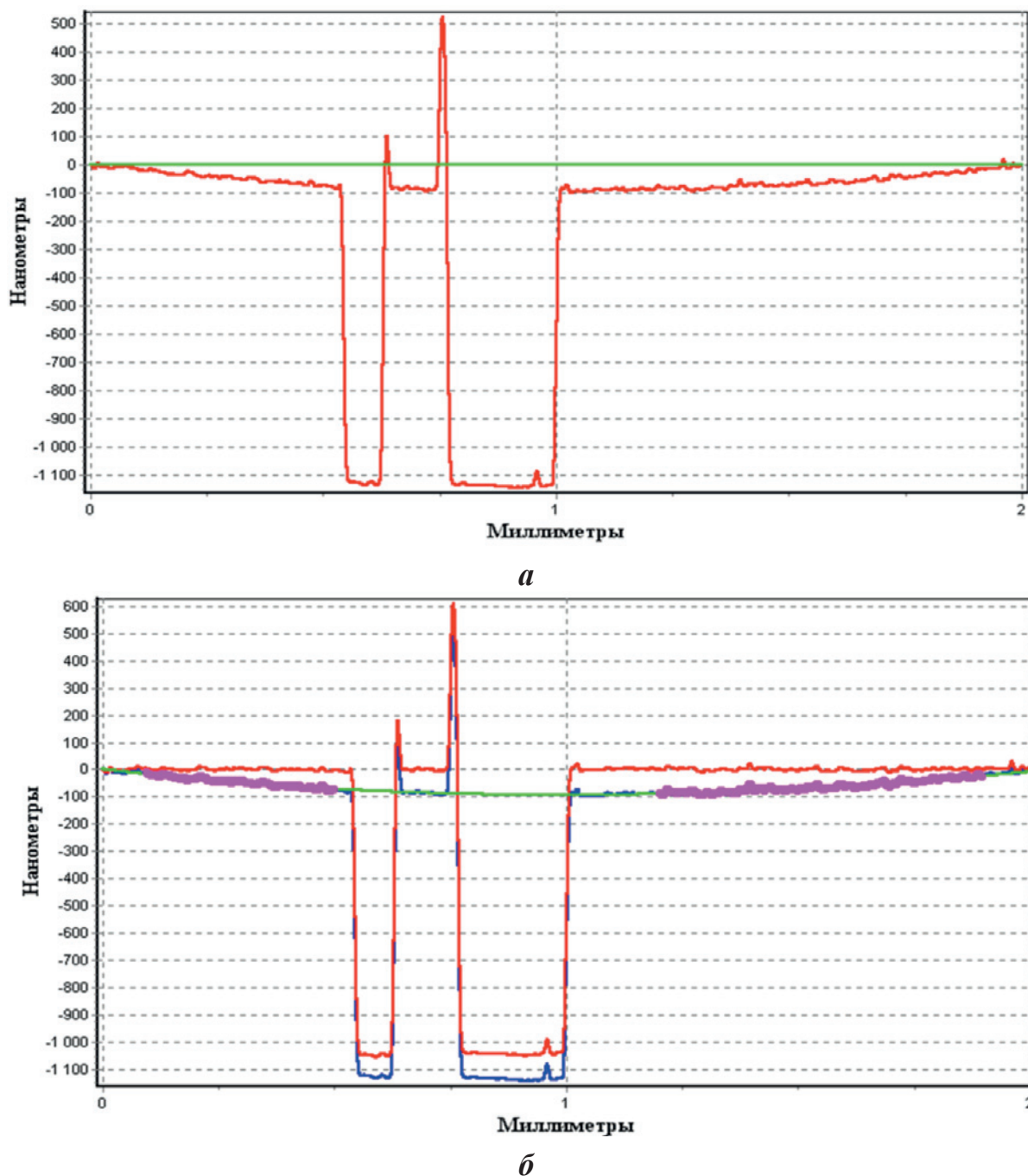


Рис. 5. Обработка данных с контактного профилометра Alpha-Step 200:
а – исходный профиль поверхности образца; *б* – профиль поверхности этого образца с произведенным выравниванием. Здесь красным цветом во всех случаях показан основной анализируемый профиль, зеленым – аппроксимирующая кривая, построенная по областям для выравнивания (показаны розовым цветом), синим (*б*) – положение исходного профиля (*а*) для сравнения. Далее используется аналогичная цветовая разбивка

Здесь и далее для демонстрации особенностей профилей поверхности используются данные, полученные на контактных профилометрах Alpha-Step 200 и Alpha-Step D-120.

Для обеспечения высокой точности измерения рельефа объект должен иметь область поверхности с четкой границей перепада высот. Однако,

в реальных производственных условиях достаточно часто имеют место случаи, в которых сложно определить расположение границы: раздела пленка/подложка, канавки или выступа на поверхности пленки; либо эта граница может быть нечеткой или размытой. Также объект измерений может отличаться существенной шероховатостью или волнистостью поверхности, соизмеримой со значением определяемого перепада высот. Во всех перечисленных случаях реально достижимая точность произведенного измерения зависит от особенности конкретной задачи.

Важно учитывать ограничения метода и конкретного оборудования при анализе профилей поверхности.

Способы создания перепада высот на поверхности пластин

В данном разделе описаны способы создания перепада высот с целью измерения толщины функциональных слоев и глубины рельефа, их достоинства и недостатки.

Существуют следующие способы создания на поверхности пластин (подложек) областей без наносимого функционального слоя и последующие процедуры обработки этих областей с целью формирования границы раздела функционального слоя и последующего определения перепада высот:

- нанесение специального покрытия (термопасты);
- использование закрывающих часть пластины элементов малой формы;
- удаление части материала функционального слоя (в т.ч. механическое);
- другие.

Наиболее оперативный и поэтому наиболее популярный способ связан с нанесением на пластину в одной или нескольких областях до осаждения функционального слоя специального покрытия (чаще всего термолака или термопасты). После осаждения функционального слоя на пластину это покрытие с нанесенным на него функциональным слоем легко снимается механически, обнажая области пластины (подложки). Таким образом, на пластине формируются области без функционального слоя, и создается перепад высот на их границах.

Обычно этот способ формирует достаточно резкий перепад высот функционального слоя, как показано на рис. 6.

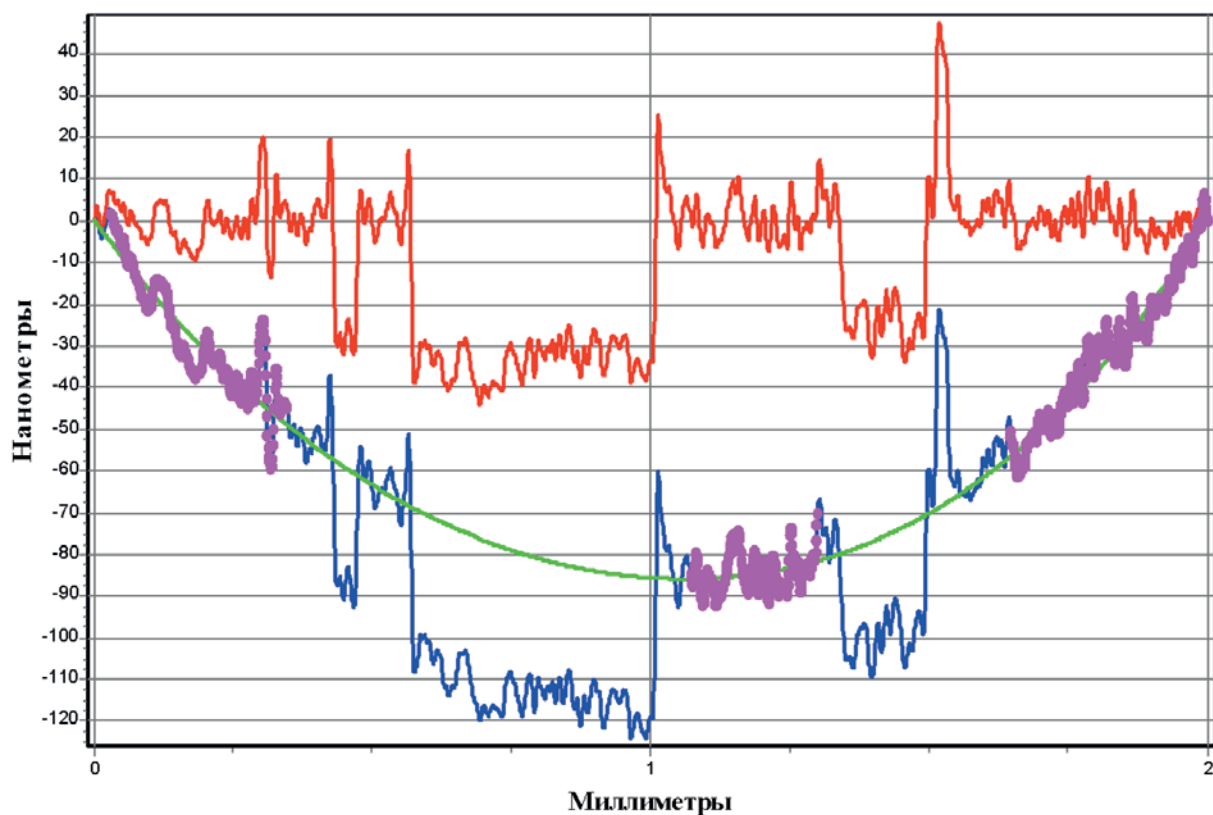


Рис. 6. Перепад высот порядка 30 нм между поверхностями функционального слоя тантала (Ta) и кремниевой (Si) подложкой, полученный при использовании термопасты для отрыва областей функционального слоя (цветовое обозначение линий как на рис. 5)

Однако у способа на основе применения термопасты имеются существенные недостатки.

1. Влияние термопасты на функциональный слой, что может привести к неверному определению значения перепада высот a , следовательно, и неверному определению толщины функционального слоя.

Например, не стоит применять способ измерения толщины функционального слоя с использованием термопасты, когда она наносится на осажденный функциональный слой, и проводится травление функционального слоя через термопасту, как через маску, с последующим механическим удалением термопасты. В этом случае присутствие термопасты может оказать влияние на близлежащую область функционального слоя, в которой происходит неполное травление функционального слоя из-за его загрязнения продуктами травления пасты. Происходит размытие границы функционального слоя.

Другим примером является возможное частичное отслаивание функционального слоя на границе с термопастой, в результате чего присутствует воздушная прослойка между этим слоем и подложкой. Это может

привести к завышенным значениям определенного перепада высот (толщины функционального слоя).

2. Загрязнения, являющиеся следствием механического стирания подвергнутой жидкостному химическому, газовому, ионному или плазмохимическому травлению термопасты, которые существенно снижают точность определения перепада высот и уменьшают размер областей сканирования, в которых возможно проведение измерений. Кроме того налипающие на зонд частицы загрязнения не способствуют эффективной работе контактного профилометра и вынуждают операторов проводить очистку зонда.

Стоит отметить, что в случае использования для измерения перепада высот атомно-силовых микроскопов (АСМ) с тонкими зондами, расположенными на кантилеверах, процедура оперативной очистки таких зондов невозможна. Поэтому приходится менять целиком кантилеверы, переводя достаточно быстро дорогостоящий расходный материал.

Другим часто применяемым способом получения на пластине (подложке) двух областей: одной с нанесенным функциональным слоем и второй без него – является использование специальных закрывающих часть пластины элементов малой формы. Обычно этими элементами являются фрагменты кремниевых пластин или тонкие металлические пластинки. На такую исследуемую подложку с закрытыми в части мест областями наносится функциональный слой; затем закрывающие фрагменты убираются, и под ними остаются области подложки без нанесенного слоя.

Данный способ в целом аналогичен вышеописанному способу с применением термопасты с соответствующими недостатками, при этом он также имеет ряд собственных ограничений. Основным из них является наличие областей подпыляемого слоя («подпыла») на закрываемых областях подложки, вызванного неплотным прижатием закрывающих элементов к поверхности подложки.

Это приводит к формированию нечеткой (растянутой) границы, формируемой ступеньки, что усложняет процедуру измерения и снижает точность измерений. Необходимо обеспечивать достаточно большую область сканирования для того, чтобы скан профиля содержал все три области: область подложки, область «подпыла» и область основного слоя. При этом часто встречающееся отсутствие четкой границы между областями затрудняет интерпретацию профиля (рис. 7).

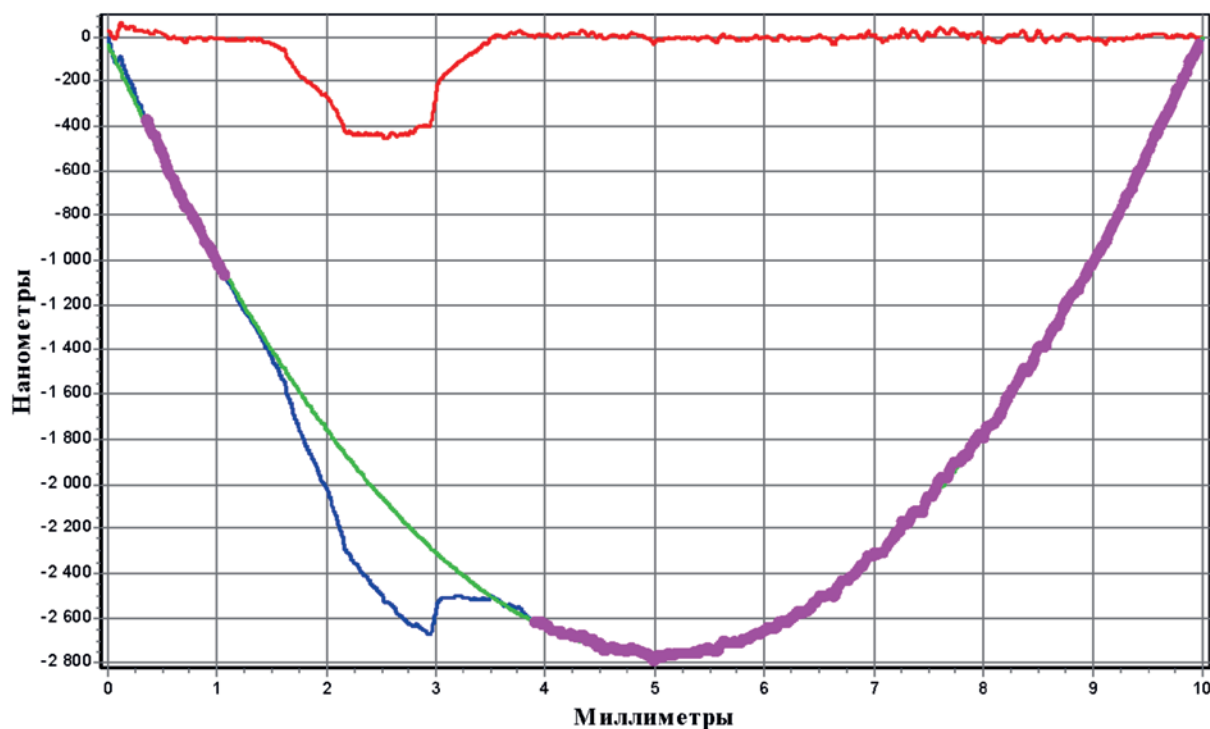


Рис. 7. Вид профиля поверхности для структур с явно вырожденной областью «подпыла»: наблюдается растянутость боковых стенок профиля (цветовое обозначение линий как на рис. 5)

В ряде установок нанесения функциональных слоев система крепления подложки (пластины) к подложкодержателю не позволяет закреплять фрагменты кремниевой пластины или тонкие металлические пластинки на поверхности подложки. В этом случае в качестве закрывающих области подложки элементов могут использоваться куски термоскотча, которые приклеиваются к поверхности подложки. Однако при отделении кусков термоскотча от поверхности подложки после нанесения на нее функционального слоя на поверхности подложки практически всегда остаются загрязнения, которые оказывают негативное влияние на попытку определения перепада высот в этих областях.

Отличными от вышеуказанных способов получения перепада высот являются способы удаления части материала функционального слоя на подложках с уже нанесенными слоями. В производственной практике также применяется несколько способов такого удаления.

При нанесении функциональных слоев из относительно мягких материалов на твердые подложки для получения «ступеньки» достаточно простого сцарапывания слоя в требуемых областях подложки инструментом из материала тверже материала функционального слоя, но мягче материала подложки. В этом случае может получиться достаточно четкая «ступенька», хорошо визуализирующаяся и удобная для измерения перепада высот, соответствующего толщине функционального слоя.

Формирование «ступенек» в функциональных слоях способом царапания обладает рядом недостатков:

– применимость не ко всем сочетаниям материалов функциональный слой – подложка (материал функционального слоя должен быть значительно мягче материала подложки, в противном случае при царапанье будет поцарапана подложка, и перепад высот будет больше толщины функционального слоя);

– относительно твердый функциональный слой может быть процарапан не до конца, и тогда значение определенного перепада высот будет занижено относительно реальной толщины слоя;

– удаленный царапаньем материал функционального слоя в подавляющем большинстве случаев остается на границе между слоем и подложкой, что приводит к существенному количеству загрязнений и всеми вытекающими из этого факта и описанными выше сложностями измерения высоты (глубины) ступеньки контактным профилометром.

Поэтому в случае, если необходимо создавать перепад высот между областями с нанесенным функциональным слоем путем травления (удаления) последнего, то необходимо, несмотря на сложность и длительность реализации, использовать процесс фото– или электронолитографии. На практике литографические процессы используются для отработки режимов нанесения функциональных слоев только для особо важных и дорогих структур и изделий.

В целом методики создания перепада высот не ограничиваются вышеописанными случаями. Например, стоит отметить необходимость определения перепада высот в кратерах травления материалов, сфокусированными ионными пучками, что имеет ряд важных особенностей [2].

При многих аналитических методах качественного и количественного исследования распределения элементного состава материала по глубине или по толщине его пленки, таких как вторично-ионная масс-спектрометрия или оже-спектроскопия, производится распыление (травление) приповерхностного слоя сфокусированными ионными пучками. Далее проводится последующий численный пересчет профиля распределения состава для структуры в зависимости от глубины кратера (углубления), образованного в результате ионного травления.

Для правильного анализа распределения необходимо очень точно знать глубину кратера травления, что во многих случаях является непростой задачей, поскольку данный кратер не обладает четкими границами. Также глубина кратера часто мала (может быть порядка 5 нм и менее), что может стать осложнением для её определения методом контактной профилометрии. При этом использование для анализа глубины кратера травления оптических методик также может привести к некорректным результатам, вызванным различиями в оптических характеристиках материалов протравленных структур, расположенных на различной глубине.

Указанные методы исследования наиболее часто применяются в производстве ИМС и МЭМС и, следовательно, их особенности должны быть известны разработчикам изделий.

Отдельно следует отметить, что исследуемые пластины практически всег-

да обладают кривизной и волнистостью поверхности, значения которых могут оказать влияние на определение перепада высот. Поэтому для достаточно точного определения перепада высот необходимо иметь две границы (две «ступеньки») чтобы учесть форму поверхности и оценивать исключительно перепад высот функционального слоя (рис. 8).

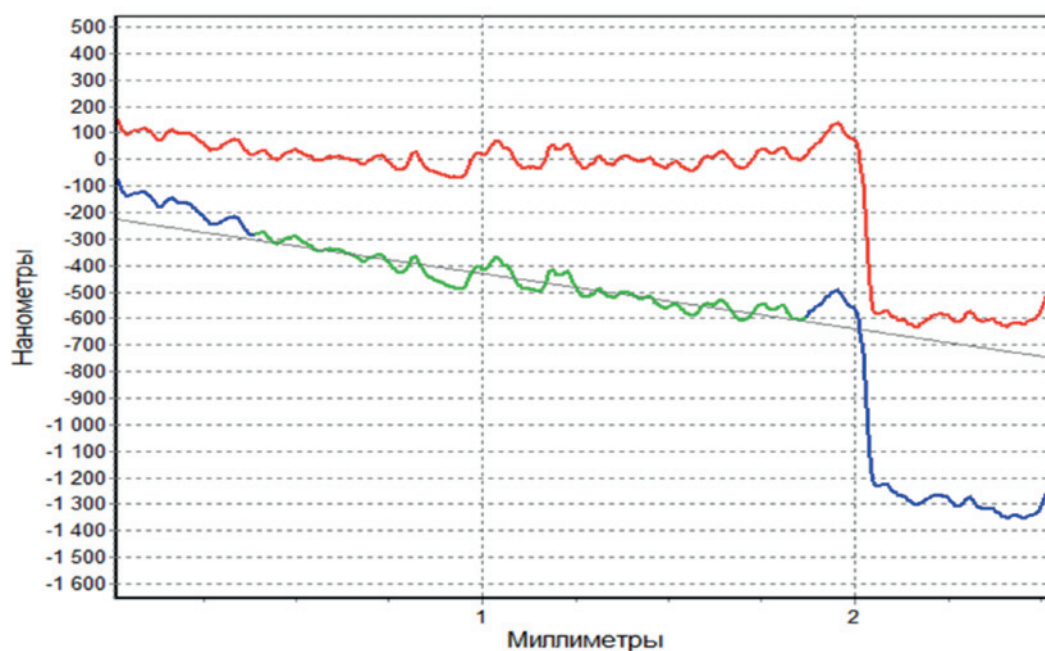
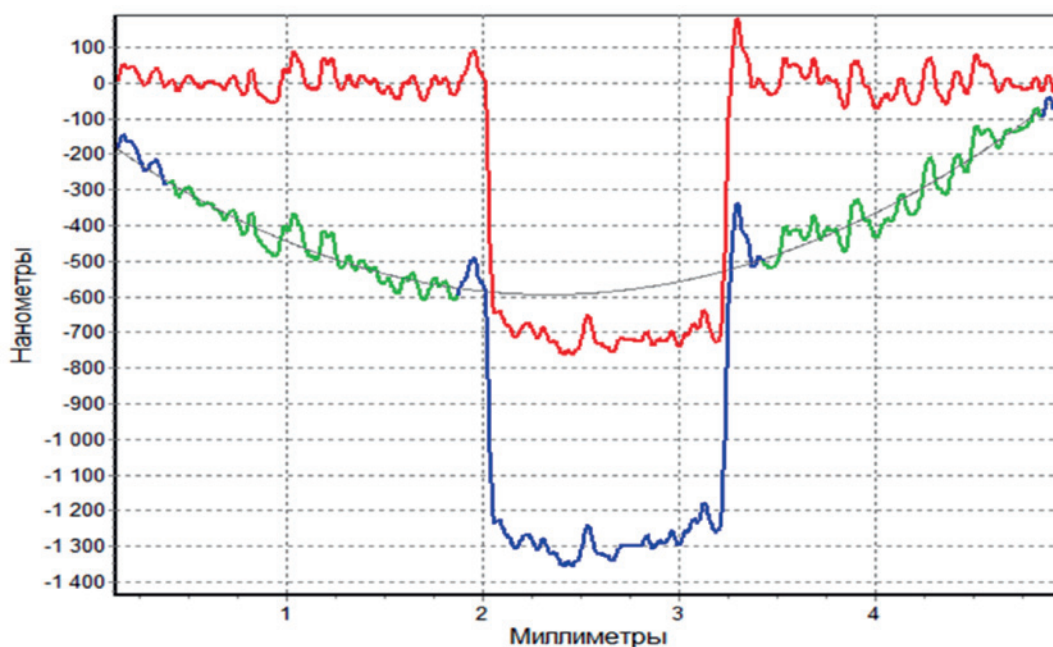
*а**б*

Рис. 8. Два способа обработки одного профиля сканирования зондом области с отсутствием пленки: *а* – изображения профиля при его выравнивании только по левому краю области (аналог снятия данных только с одной стороны «ступеньки»); *б* – изображения профиля при его выравнивании по обоим краям области (наблюдается различие в определяемом двумя способами значении перепада высот). Цветовое обозначение линий как на рис. 5

Сравнение метода контактной профилометрии с другими методами

В целом методы и приборы, которое принято использовать для определения перепада высот на структурах в производстве ИМС и МЭМС, можно разделить по принципам работы:

- контактная профилометрия (подробно описана выше);
- атомно-силовая микроскопия (АСМ);
- оптические методики определения перепада высот, в том числе оптическая профилометрия;
- другие методы.

Контактная профилометрия имеет свою устоявшуюся область применения в микроэлектронном производстве. Она позволяет контролировать структуры и изделия, которые удовлетворяют следующим условиям:

- перепад высот более 5 нм для идеально плоской и гладкой поверхности подложек и обычно более (10 – 20) нм для реальных поверхностей подложек;
- перепад высот структур должен иметь достаточно резкую границу раздела;
- структура должна иметь подходящие размеры для работы на используемом приборе.

В условиях производства простой контактный профилометр позволяет достаточно быстро (менее минуты непосредственно на одно измерение) определить перепад высот, без применения специального программного обеспечения и сложной настройки на образце, что отличает метод контактной профилометрии от остальных перечисленных выше методов.

Исследования структур методом АСМ занимает гораздо больше времени, чем анализ контактными или оптическими профилометрами. В настоящее время анализ образцов на АСМ чаще является скорее научно-исследовательской работой, чем межоперационным контролем или методом определения толщины при отработке режимов технологических операций. Однако, в некоторых случаях он незаменим. Так в случае малых перепадов высот при использовании контактной профилометрии часто не удается четко выделить границу слоя и определить перепад высот, особенно в случае высокой степени шероховатости и наличия загрязнений на поверхности образца.

При этом в части других случаев использование АСМ может привести к ошибкам измерения. Выбор области и длины исследуемого образца определяется инженером-метрологом в зависимости от конкретной ситуации, опыта работы и возможностей используемого оборудования.

В случае контактной профилометрии длина сканирования обычно лежит в диапазоне (400 – 2000) мкм, в случае атомной силовой микроскопии – редко превышает 100 мкм. При размытой границе раздела между областями

поверхности образца, покрытыми функциональным слоем и без него наблюдаемый перепад высот часто бывает меньше (рис. 9, *а*) или наоборот больше (рис. 9, *б*) его истинных значений, что приводит к неизбежным ошибкам при определении перепада высот в случае выбора слишком малой длины сканирования.

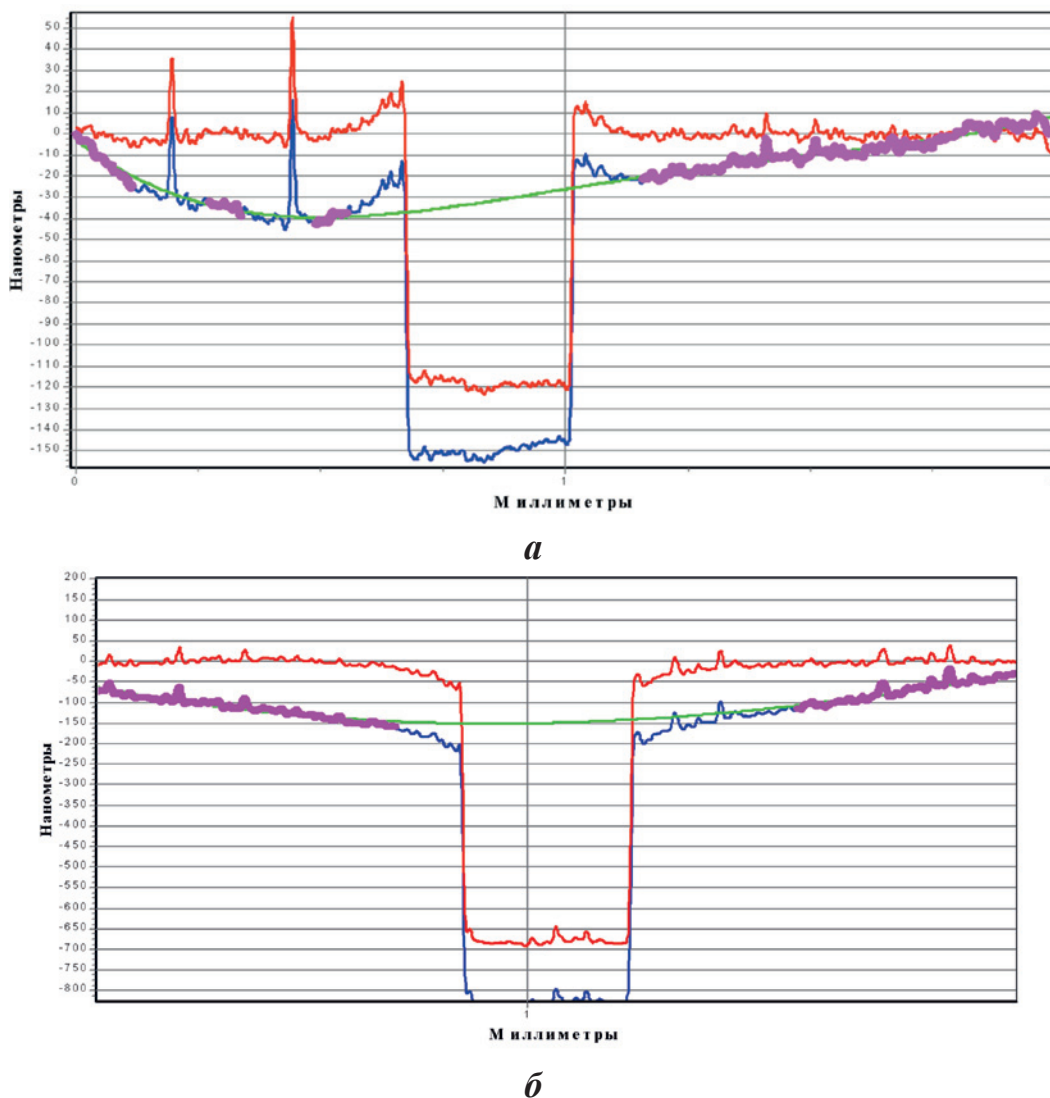


Рис. 9. Типичные профили поверхности образцов:

а – случай, при котором при выборе малой длины сканирования наблюдаемый перепад высот больше на 20 нм (при истинном перепаде высот в 120 нм);

б – случай, при котором при малой длине сканирования наблюдаемый перепад высот меньше на 50 нм (при истинном перепаде высот порядка 680 нм). Цветовое обозначение линий как на рис. 5

Метод оптической профилометрии для определения перепада высот имеет свои преимущества, в том числе бесконтактность (что позволяет анализировать мягкие пластичные материалы) и возможность определять перепады высот менее 5 нм с высокой точностью. Но его использование также имеет ряд ограничений. Основной недостаток метода оптической профилометрии

связан с ошибками, возникающими при анализе перепада высот на структурах с различными оптическими характеристиками. [8-10].

Следует отметить, в последних выпускаемых моделях современного комбинированного аналитического оборудования, использующего оптические методики получения информации об исследуемых объектах, например [11], данная проблема решена.

Однако далеко не каждая организация может позволить себе приобрести новое дорогостоящее оборудование в дополнении к уже имеющемуся подобного типа. Поэтому необходимо для решения возникающих производственных задач обходиться имеющимися в наличии контрольно-измерительными приборами на основе метода оптической профилометрии. Одним из методов решения этой проблемы является покрытие исследуемой рельефной поверхности непрозрачным металлическим слоем определенной толщины [12].

Отдельно стоит отметить, что использование атомно-силовых микроскопов и оптических профилометров, в отличие от большинства простых контактных профилометров, позволяет строить 3D карты поверхности, а не один профиль (линию). Это дает возможность при анализе выбрать наиболее подходящее направление, а также определить форму углубления и наибольшее значение глубины. В типичном случае использования простого контактного профилометра максимальный перепад высот будет определен исходя из того, какая область попадет в зону анализа – на линию сканирования, и это может быть далеко не самая глубокая область.

В ряде случаев необходимо получение полной карты рельефа образца, например для оценки распределения и изменения его характеристик по поверхности пластины или ее области. Поэтому современные сложные контактные профилометры включают модули, позволяющие объединять данные с различных областей анализа (сканирования), что дает возможность осуществлять «сшивку» серии профилей в единое 3D-изображение и работать с ним.

При этом инженер-метролог может программно на управляющем компьютере выбирать направление сканирования, шаг между отдельными профилями поверхности и момент завершения. Затем автоматически производится запись отдельного профиля поверхности (рис. 10, *а*), возвращение зонда в начальное положение, его смещение на выбранный шаг и запись следующего профиля поверхности и так далее. В заключение компьютерная программа преобразует все снятые профили в цельное 3D-изображение (рис. 10, *б*).

Полученный результат весьма информативен (рис. 10, *б*) и позволяет оценить особенности рельефа поверхности. Однако такой метод получения данных достаточно трудоемок и длителен, поэтому редко применяется в условиях производства.

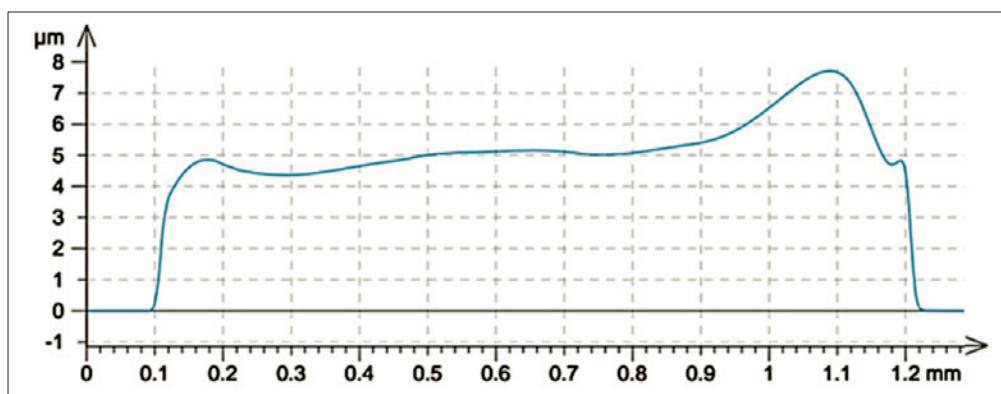
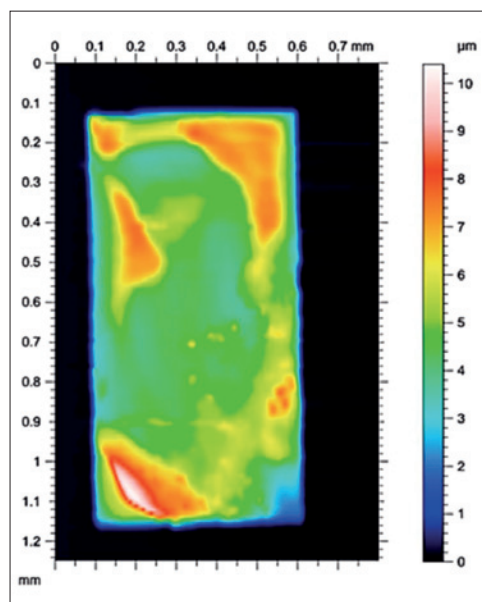
*a**б*

Рис. 10. Одиночный профиль поверхности, полученный на контактном профилометре Alpha-Step D-120 (*a*); карта перепада высот, полученная объединением профилей поверхности (*б*).

Заключение

В работе на конкретных примерах показаны возможности и ограничения метода контактной профилометрии при измерении рельефа микро- и наноструктур, формируемых на подложках в процессе производства ИМС и МЭМС. Данный метод эффективен при определении перепада высот более 5-10 нм, при условии, что размеры исследуемой структуры соответствуют возможностям используемого прибора, определяемыми в первую очередь геометрией и длиной хода зонда. Описаны основные используемые способы формирования ступенек для измерения толщины пленок методом контактной профилометрии: нанесение специального покрытия (термопасты), использование закрывающих часть пластины элементов малой формы, удаление части материала функционального слоя; проанализированы их преимущества и недостатки. Проведено сравнение метода контактной профилометрии с оптическими методами и атомно-силовой микроскопией.

Поддержка

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» НИУ МИЭТ, поддержанного Минобрнауки РФ, в рамках выполнения работ по Соглашению № 075-03-2020-216 от 27.12.2019 (тема FSMR-2020-0017, мнемокод 0719-2020-0017).

Литература:

1. Дедкова А.А., Дюжев Н.А., Гусев Е.Э., Махиборода М.А., Патюков Н.Н. Измерение механических напряжений в фрагменте пленки нитрида кремния // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование, 2017, 17 (1), С. 51-64.
2. Дедкова А.А., Киреев В.Ю., Мысловец А.С., Розель П.А., Трифонов А.Ю. Исследование возможности получения структур с нанометровыми толщинами слоев и резкими границами раздела между ними с помощью процессов ионно-лучевого и реактивного ионно-лучевого осаждения // Российские нанотехнологии, 2019, 14 (5-6), С. 50-55, DOI: 10.21517/1992-7223-2019-5-6-50-55.
3. Abbot E.J., Bousky S., Williamson D.E. The Profilometer // Mechanical Engineering, 1938, 60, P. 205-216.
4. Abbot E.J., Firestone F.A. Specifying surface quality: a method based on accurate measurement and comparison // Mechanical Engineering, 1933, 65, P.569-572.
5. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт // Под ред. канд. техн. наук Н.А. Табачниковой. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2007, 136 с.
6. Мальков О.В., Литвиненко А.В. Измерение параметров шероховатости поверхности детали // Электронное учебное пособие, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, URL: http://mt2.bmstu.ru/books/ish/Roughness_measurement.pdf.
7. Alpha-Step 200. Tencor Instruments. User's manual.
8. Трушников Е.О. Исследование степени достоверности бесконтактной профилометрии на прозрачных кристаллах после их травления // Пермский государственный национальный исследовательский университет, С. 32-36.
9. Dubois A. Effects of phase change on reflection in phase-measuring interference microscopy // Applied Optics., 2004, 43 (7), P. 1503-1507.
10. Азарова В.В., Чертович И.В., Цветкова Т.В. Особенности применения интерферометра белого света для контроля качества прецизионных поверхностей и лазерных зеркал // Труды XI Медвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 2009, С. 1-6.
11. URL: <https://www.intertech-corp.ru/aboutproduct.asp?gr=21&subgr=71&prid=397>.
12. Патент RU 2718404 С1.

POSSIBILITIES AND LIMITATIONS OF THE CONTACT PROFILOMETRY METHOD FOR DETERMINING THE HEIGHT DIFFERENCE FOR MONITORING TOPOLOGICAL ELEMENTS AND LAYER THICKNESS

Dedkova A.A., Kireev V. Yu., Makhaboroda M.A.

dedkova@ckp-miet.ru, valerikireev@mail.ru, m.makhaboroda@gmail.com
National Research University of Electronic Technology, Moscow

Received 12.07. 2020

The work shows specific examples of the possibilities and limitations of the contact profilometry method for measuring the relief of micro and nanostructures formed on substrates during the production of microelectronic devices. The requirements to the relief parameters of microelectronic structures are formulated, which make it possible to use contact profilometers for their measurement and control. Methods of forming steps for measuring the thickness of films by contact profilometry are described, and their advantages and disadvantages are analyzed. The method of contact profilometry with optical profilometry and atomic force microscopy is compared.

Keywords: surface relief, height difference, contact profilometry, contact profilometer, layer thickness control, surface, step height measurement