

УДК 681.782.44(045)

С.Р. ИГНАТОВИЧ, И.М. ЗАКИЕВ, В.И. ЗАКИЕВ

Национальный авиационный университет, Украина

МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО РЕЛЬЕФА ОБЪЕКТОВ В ТРЕХМЕРНОМ НАНОМЕТРИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Рассмотрены оптические бесконтактные интерференционные методы измерения геометрических величин и анализа микропрофиля поверхностей. Приведены методы модернизации и автоматизации для трехмерного анализа микронеровностей.

интерференция, микро топография, микроинтерферометр Линника, трехмерный профиль

Введение

Наиболее точными методами бесконтактного контроля оптических неоднородностей, измерения геометрических величин и анализа микропрофиля поверхностей, как известно, являются интерференционные методы. Особый смысл эти измерения приобретают в связи с тем, что эталон длины – метр – определяется через длину световой волны.

Уже давно ученые отказались от линейки – метра, которая могла бы служить первичным эталоном длины. Наиболее надежной мерой является длина световой волны спектральной линии [1 – 3].

Развитие лазерной техники, широкое распространение новых типов приемников излучения, прежде всего цифровых видеокамер на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС), сопряженных с компьютерами, создали предпосылки для широкого распространения систем компьютерной обработки интерференционных картин в реальном масштабе времени [4, 5].

Формулирование проблемы

Одним из бесконтактных оптических способов измерения высоты микронеровностей или следов обработки на металлических и других поверхностях высокого класса точности является микроинтерферометр Линника, который представляет собой сочетание интерферометра и микроскопа. [1].

Рассмотрим принцип действия микроинтерферометра (рис. 1).

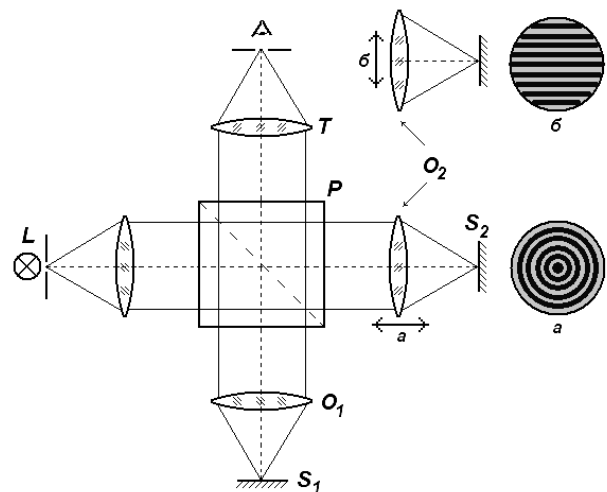


Рис. 1. Принципиальная схема микроинтерферометра Линника

Исследуемый объект S_1 в виде зеркала и эталонное зеркало S_2 помещены в фокальных плоскостях микрообъективов O_1 и O_2 . В этом случае изображения объекта и зеркала получаются в фокальной плоскости зрительной трубы T . Зеркала S_1 и S_2 перпендикулярны оптической оси. Оптические длины обеих ветвей интерферометра одинаковы относительно делительной призмы P . При таком положении элементов в интерферометре разность хода между любой парой соответствующих лучей равна нулю, и в поле зрения наблюдается бесконечно широкая полоса равного наклона нулевого порядка. Если теперь переместить зеркало S_2 вдоль оптической

ской оси, то один из интерферирующих волновых фронтов станет сферическим.

В этом случае в поле зрения интерферометра будут наблюдаться кольца равной толщины (типа колец Ньютона), центрированные относительно оптической оси (рис. 1, а). Однако кольцеобразная форма интерференционных полос совершенно непригодна для измерения высоты неровностей. Чтобы получить удобные для измерения прямолинейные интерференционные полосы, надо в этот симметричный ход лучей внести несимметричность, которая не оказывала бы влияния на качество изображения. Это достигается перемещением микрообъектива O_2 перпендикулярно оптической оси. Перемещения не оказывают никакого влияния на качество изображения, так как между микрообъективом и зрительной трубой имеется параллельный ход лучей.

Не изменится также длина хода лучей, параллельных оптической оси. Однако длина хода лучей в наклонных пучках изменится, и между двумя соответствующими наклонными лучами возникает некоторая разность хода, величина которого будет зависеть от угла наклона этих лучей и величины смещения микрообъектива O_2 (рис. 1, б). Изменяя направление смещения микрообъектива O_2 , можно поворачивать интерференционные полосы в желаемом направлении. В микроинтерферометре можно наблюдать интерференционную картину и в белом, и в монохроматическом свете.

В отъюстированном интерферометре наблюдается одновременно интерференционная картина и поверхность исследуемого объекта. Если на исследуемой поверхности имеется бугор или впадина, то в этом месте разность хода меняется и, следовательно, интерференционные полосы смещаются. При интерференционных измерениях смещение полос обычно измеряется визуально в долях интервала между полосами. Очевидно, что смещение полос, равное одному интервалу, происходит при изменении разности хода на одну длину волны. Обозначим

глубину впадины через H . Тогда разность хода ΔH , вызванная наличием впадины, будет равна $\Delta H = 2H$. Она дает смещение интерференционных полос на p долей интервала. При наблюдении в монохроматическом свете $\Delta H = p\lambda$. Очевидно, что глубина впадин H определится следующим образом: $H = p\lambda/2$.

Обычно визуально можно оценить величину искривления интерференционных полос, составляющих приблизительно 0,1 интервала между ними ($p = 0,1$). В этом случае наименьшая высота неровности, которая может быть измерена визуально, равна $H_{\min} = 0,05\lambda$, и в белом свете будет составлять около 13 нм.

Если сместить зеркало S_2 перпендикулярно оптической оси на 13 нм, то интерференционные полосы сместятся относительно исходного положения на величину, равную 0,1 интервала между полосами. Таким образом, при визуальном наблюдении можно регистрировать глубину (высоту) неровностей с точностью, равной приближенно 10 нм. Однако, если размер неровности соизмерим с шириной полосы (1 – 5 мкм), то определение его глубины (высоты) практически невозможно.

В качестве примера на рис. 2 приведены микрофотографии (полученные на микроинтерферометре Линника МИИ-4) ямки травления глубиной 0,1 мкм и размером 20×20 мкм в отраженном свете (а) и в интерференционном поле (б).

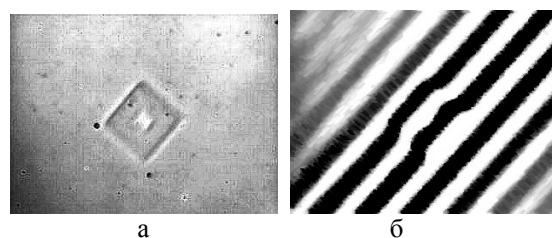


Рис. 2. Микрофотографии ямки травления
а – в отраженном свете,
б – в интерференционном поле

Решение проблемы

Для увеличения точности измерения микрорельефа и получения его трехмерного изображения мик-

роинтерферометр Линника был модернизирован следующим образом (рис. 3).

Вместо эталонного неподвижного зеркала устанавливается подвижное зеркало 11, которое посредством электромагнитной катушки может двигаться строго перпендикулярно оптической оси. Электромагнитный механизм смещения зеркала подключен к 16-ти разрядному ЦАП с усилителем 12, на вход которого поступает цифровой код положения зеркала, задаваемый программным обеспечением посредством компьютера 1. Применение 16-ти разрядного ЦАП позволяет обеспечивать большой динамический диапазон перемещений, например, с шагом смещения $n = 1$ нм ход зеркала 11 может составлять 65535 нм, или 65,535 мкм.

Рассмотрим принцип действия модернизированного интерферометра. Пучок света от лампы накаливания 7, яркость которой регулируется 8-ми разрядным ЦАП с усилителем 13, проходит через круглую входную ирисовую диафрагму 6, объектив входного коллиматора 5 и падает на полупрозрачное зеркало 4, на котором он расщепляется на два пучка – проходящий и отраженный. Первый пучок отражается от подвижного зеркала 11, проходит через объектив 10, и часть его направляется зеркалом 4 в объектив выходного коллиматора 3 и на ПЗС матрицу 2. Второй пучок падает через объектив 8 на поверхность исследуемого образца 9 и в случае зеркальной поверхности образца, отражаясь от него, возвращается обратно, проходит через зеркало 4, идет далее по одному пути с первым пучком, интерферирует с ним, создавая на ПЗС матрице 2 интерференционную картину, соответствующую разности хода обеих пучков. Эта картина, представляющая (в случае зеркальной поверхности образца) систему колец с синусоидальным распределением интенсивности и с выраженным максимумом, регистрируется компьютером 1. Максимумы и минимумы картины соответствуют разностям хода, равным целому и половинному числу волн.

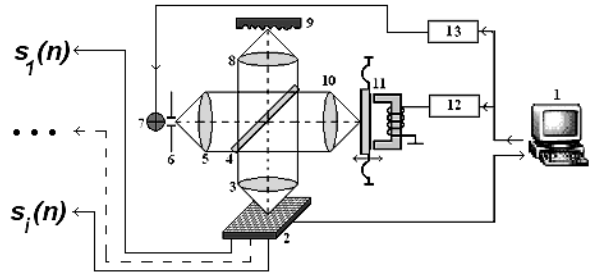


Рис. 3. Принципиальная схема модернизированного микроинтерферометра Линника

На рис. 4 иллюстрируются интенсивности s сигналов в i -х точках поля интерференции, где индексом i обозначена точка, определяемая парой дискретных координат (p, q) , которые являются номерами столбца и строки в матрице отсчетов ПЗС. Максимум видности интерференционных полос в i -й точке наблюдается при нулевой разности хода световых волн в интерферометре при соответствующем положении подвижного отражателя. По последовательности кадров восстанавливаются искомые характеристики поверхности объекта, т.е. регистрируются значения максимумов (высот) во всех точках матрицы ПЗС.

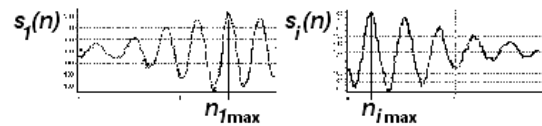


Рис. 4. Зависимость интенсивности сигналов в разных точках ПЗС матрицы

Иными словами, максимум видности совпадает с точкой нулевой разности хода световых волн в интерферометре и, в общем случае, достигается для каждой точки i в матрице (p, q) при различных положениях подвижного отражателя. Поэтому регистрация номера кадра n , соответствующего максимуму видности для точек (p, q) , позволяет получить информацию о топографии поверхности исследуемого объекта.

В качестве примера на рис. 5 приводится результат восстановления топографии ямки травления, изображенной на рис. 2, в двухмерном и трехмерном изображениях. Шаг дискретизации (сканирования) при этом составлял 1 нм.

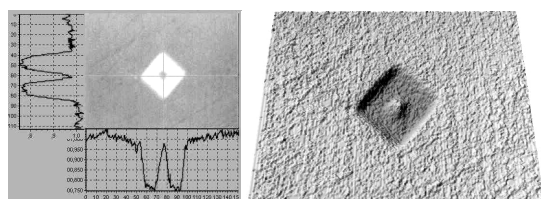


Рис. 5. Изображение ямки травления:
а – двухмерное; б – трехмерное

При сканировании с разрешающей способностью ПЗС матрицы 640 пикселей по горизонтали и 480 пикселей по вертикали, что по площади составляет $640 \times 480 = 307200$ пикселей, было вычислено и зарегистрировано такое же количество значений максимумов интенсивности светового потока при интерференции в каждой точке. В результате чего регистрируется и хранится в памяти трехмерный массив чисел, т.е. значения высот, соответствующих каждому пикселю. Сохраненный массив высоты каждой точки позволяет в последующем регистрировать профиль и вычислять параметры шероховатости в любом направлении, вращать трехмерное изображение на экране для просмотра под любым ракурсом и рассматривать сечение, образованное секущей плоскостью.

На рис. 6 представлены 3-D профили следов индентирования (пирамида Берковича, шар) на различных материалах, полученные с шагом сканирования 5 нм и максимальной высотой около 5 мкм.

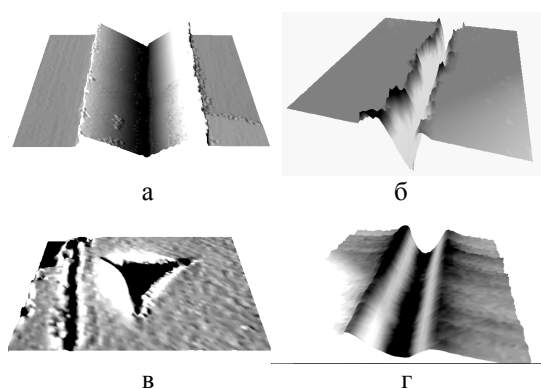


Рис. 6. 3D изображения царапин и отпечатка:
а – сталь, нагрузка 200 г; б – кремний, нагрузка 20 г;
в – оргстекло, нагрузка 30 г; г – Д16, нагрузка 50 г

В качестве примера на рис. 7 приведены различные трехмерные профили.

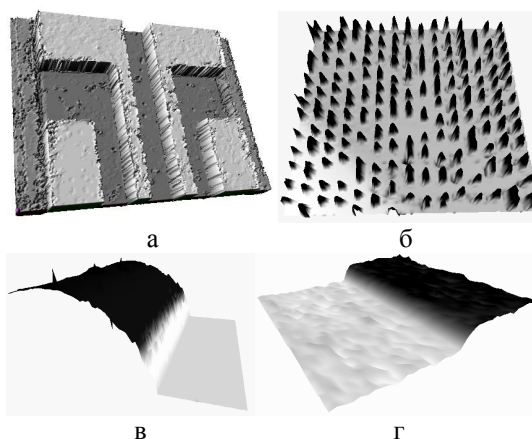


Рис. 7. Трехмерные профили:
а – дорожки современной микросхемы;
б – питы CD-ROM; в – след маркера на стекле;
г – ступенька на кремнии высотой 20 нм

Заключение

Представленная методика модернизации микроинтерферометра позволяет бесконтактно регистрировать с высокой точностью трехмерные профилограммы поверхностных слоев материалов. Благодаря этому открываются широкие возможности в исследовании процессов индентирования, связанных с формоизменением поверхностных слоев в результате упругопластических деформаций.

Литература

1. Нагибина И.М., Москалев В.А. Полушкина Н.А., Рудин В.Л. Прикладная физическая оптика. – М.: Высш. шк., 2002. – 565 с.
2. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. – М.: МГУ, 1998. – 656 с.
3. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин. – Л.: Наука, 1985. – 112 с.
4. Васильев В.Н., Гуров И.П. Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам. – СПб: ВНУ, 1998. – 238 с.
5. Скоков И.В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1989. – 255 с.

Поступила в редакцию 6.06.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.В. Щепетов, Национальный авиационный университет, Киев.