



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2011146313/07, 16.11.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
16.11.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.11.2011

(45) Опубликовано: 10.04.2013 Бюл. № 10

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2124251 C1, 27.12.1998. RU 2359221 C1, 20.06.2009. RU 78368 U1, 20.11.2008. US 5193385 A, 16.03.1993. EP 847590 B1, 18.11.2009.

Адрес для переписки:

119526, Москва, пр-кт Вернадского, 101,  
корп.1, ИПМех РАН, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Гольдштейн Роберт Вениаминович (RU),  
Козинцев Виктор Михайлович (RU),  
Подлесных Алексей Викторович (RU),  
Попов Александр Леонидович (RU),  
Самохвалов Геннадий Васильевич (RU),  
Солодовников Сергей Иванович (RU),  
Челюбеев Дмитрий Анатольевич (RU)

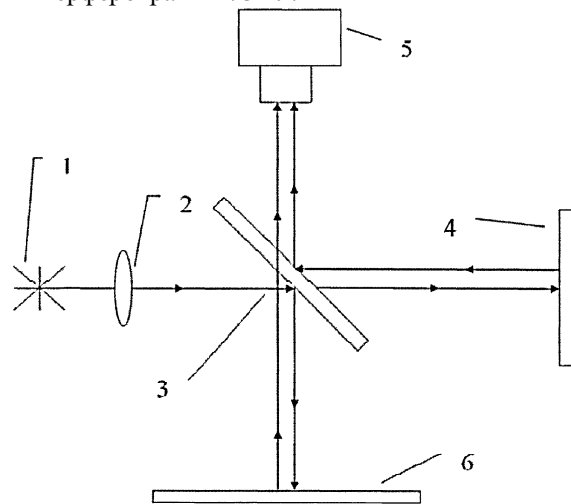
(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт проблем  
механики им. А.Ю. Ишлинского Российской  
академии наук (ИПМех РАН) (RU)**(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике. Технический результат - повышение информативности о профиле поверхности, скорости съема и обработки информации. Способ определения рельефа поверхности включает перемещение вдоль исследуемой поверхности набора чувствительных элементов и регистрацию их показаний, пропорциональных изменениям рельефа. Чувствительные элементы выполняют упругими, не контактирующими друг с другом и плотно заполняющими область плоскости над исследуемым участком поверхности, размещают их в поле зрения спекл-интерферометра, регистрируют в качестве опорной спеклограмму чувствительных элементов до начала их перемещения вдоль исследуемой поверхности и их спеклограмму в каждый момент времени в процессе перемещения, сравнивают эти спеклограммы путем вычитания и по полученной в результате сравнения спекл-интерферограмме, на которой

одновременно в реальном масштабе времени регистрируются линии уровня микроперемещений всех чувствительных элементов набора в виде спекл-интерферометрических полос, и определяют прогиб каждого чувствительного элемента по соответствующему фрагменту спекл-интерферограммы. 3 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*H01J 37/28* (2006.01)  
*G01B 9/00* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2011146313/07, 16.11.2011

(24) Effective date for property rights:  
16.11.2011

Priority:

(22) Date of filing: 16.11.2011

(45) Date of publication: 10.04.2013 Bull. 10

Mail address:

119526, Moskva, pr-kt Vernadskogo, 101, korp.1,  
IPMekh RAN, patentnyj otdel

(72) Inventor(s):

**Gol'dshtejn Robert Veniaminovich (RU),  
Kozintsev Viktor Mikhajlovich (RU),  
Podlesnykh Aleksej Viktorovich (RU),  
Popov Aleksandr Leonidovich (RU),  
Samokhvalov Gennadij Vasil'evich (RU),  
Solodovnikov Sergej Ivanovich (RU),  
Cheljubeev Dmitrij Anatol'evich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe  
uchrezhdenie nauki Institut problem mekhaniki  
im. A.Ju. Ishlinskogo Rossijskoj akademii nauk  
(IPMekh RAN) (RU)**

(54) **SURFACE RELIEF DETERMINING METHOD**

(57) Abstract:

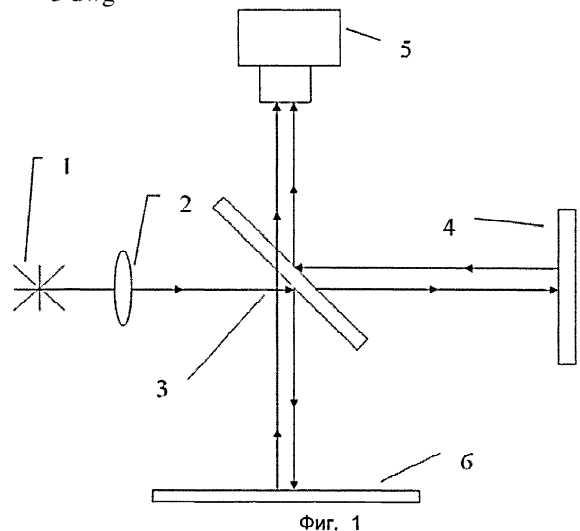
FIELD: measurement equipment.

SUBSTANCE: surface relief determining method involves movement along the investigated surface of a set of sensitive elements and recording of their readings proportional to relief changes. Sensitive elements are elastic; they do not contact each other and tightly fill in the plane area above the investigated surface section; they are arranged in field of vision of speckle interferometer; specklogram of sensitive elements is recorded as a reference one prior to the beginning of their movement along the investigated surface and their specklogram at each time moment during movement; those specklograms are compared by means of deduction, and as per the speckle interferometer obtained as a result of comparison, in which simultaneous real-time recording of the lines of micromovement level of all sensitive elements of the set in the form of speckle interferometer bands is performed, and deflection of each sensitive element

is determined as per the corresponding fragment of speckle interferogram.

EFFECT: increasing informativity on the surface profile, and information retrieval and processing speed.

3 dwg



RU 2 4 7 9 0 6 3 C 1

RU 2 4 7 9 0 6 3 C 1

Изобретение относится к измерительной технике, в частности к средствам контроля рельефа и поверхностных свойств образцов с помощью профилометров, в частности к сканирующей зондовой микроскопии (SPM-микроскопии), в частности к атомно-силовой микроскопии (AFM- или АСМ-микроскопии), и может быть использовано для  
5 получения пространственных распределений свойств поверхности и расположенных на ней слоев.

Известно устройство перемещений для нанотехнологии, содержащее пьезопривод, жестко связанный с неподвижной платформой, зонд, закрепленный на пьезоприводе и  
10 связанный с подложкой, установленной на подложке-держателе, жестко связанном с неподвижным основанием (RU 30030 U1 [1]).

Недостатком известного устройства является невозможность измерения перемещений зонда пьезопривода при выполнении нанотехнологических операций.

Известно устройство (RU 78368 U1[2]) перемещений для нанотехнологии,  
15 содержащее пьезопривод, жестко связанный с неподвижной платформой, зонд, закрепленный на пьезоприводе и связанный с подложкой, установленной на подложкодержателе, который жестко связан с неподвижным основанием. Зонд закреплен на пьезоприводе посредством упругой консольной балки, на рабочую  
20 поверхность которой нанесен тонкий слой серебра. Устройство снабжено источником лазерного излучения, зеркалом и фотоприемником лазерного излучения; при этом источник лазерного излучения и зеркало жестко связаны с неподвижной платформой. Источник лазерного излучения установлен на неподвижной платформе с  
25 возможностью многократного падения-отражения луча лазера от рабочей поверхности балки и зеркала. Введение в устройство перемещений для нанотехнологии тонкого слоя серебра, нанесенного на рабочую поверхность консольной балки, обеспечивающего возможность многократного отражения лучей  
30 от рабочей поверхности, источника лазерного излучения, установленного на неподвижной опоре, зеркала, жестко связанного с неподвижной опорой, фотоприемника позволяет определять перемещения сканирующего зонда.

Недостатком известного устройства является относительная сложность средства регистрации перемещений, трудность разделения изгибных и крутильных перемещений зонда и малая производительность, обусловленная наличием всего одного зонда.

Известен многозондовый кантилевер для сканирующего зондового микроскопа (СЗМ), реализующий способ определения рельефа поверхности и представляющий собой основание, к которому крепятся три одинаковые прямоугольные балки,  
40 являющиеся гибкой обкладкой конденсатора, на дальнем от основания конце которых расположены иглы (N. Blanc, J. Brugger and N.F. de Rooij "Scanning force microscopy in the dynamic mode using microfabricated capacitive sensors" J. Vacuum Science Technology В 14(2), Mar/Apr 1996, pp.901-905 [3]). Балки размещены над жесткими основаниями, которые служат второй обкладкой конденсатора. При изгибе балок, возникающем при сканировании исследуемого образца, измеряется изменение емкости между балкой  
45 и жестким основанием.

Недостатком указанного устройства является паразитная чувствительность к параметрам окружающей среды (изменению ее диэлектрической постоянной). Кроме этого, возможно возникновение паразитного влияния емкости между двумя соседними  
50 балками, что накладывает ограничение на уменьшение расстояния между ними.

Наиболее близким к заявляемому изобретению по своей технической сущности является способ наблюдения рельефа исследуемой поверхности, реализуемый с помощью кантилевера для сканирующего зондового микроскопа, состоящего из

основания, к которому прикреплены несколько балок с иглами, расположенными на дальнем от основания конце каждой балки. Концы игл расположены в одной плоскости и каждая балка имеет отличную от других резонансную частоту колебаний (RU 2124251 [4]).

5       Способ реализуется следующим образом. При сканировании исследуемой поверхности возбуждают резонансные колебания каждой из балок. При движении игл кантилевера вдоль рельефа исследуемой поверхности происходит изменение параметров колебания (частота, амплитуда, фаза). Изменение этих характеристик  
10       измеряется сканирующим зондовым микроскопом. Для этого в выходном сигнале выделяется частота, принадлежащая каждой из балок, и определяется изменение параметров колебания каждой из них. Например, при оптическом считывании сигнала в СЗМ выходной сигнал поступает с фотодиода. Он содержит все частоты,  
15       принадлежащие каждой из балок кантилевера. Проведя селекцию их частот, можно детектировать сигнал, принадлежащий отдельной балке, и наблюдать изображение исследуемой поверхности, получаемое с каждой балки.

      Недостатком известного способа является сложность обработки (при большом количестве зондов) поступающей от каждого из зондов информации, необходимость в  
20       специальном оборудовании (каждый из зондов должен иметь характерную резонансную частоту) для реализации способа. В результате производительность исследования рельефа поверхности будет невысокой.

      Заявляемый способ определения рельефа поверхности направлен на повышение информативности о профиле поверхности, скорости съема и обработки информации.

25       Указанный результат достигается тем, что способ определения рельефа поверхности включает перемещение вдоль исследуемой поверхности набора чувствительных элементов и регистрацию их показаний, пропорциональных изменениям рельефа, при этом чувствительные элементы выполняют упругими, не  
30       контактирующими друг с другом и плотно заполняющими область плоскости над исследуемым участком поверхности, размещают их в поле зрения спекл-интерферометра, регистрируют в качестве опорной спеклограмму чувствительных элементов до начала их перемещения вдоль исследуемой поверхности и их спеклограмму в каждый момент времени в процессе перемещения, сравнивают эти  
35       спеклограммы путем вычитания и по полученной в результате сравнения спекл-интерферограмме, на которой одновременно в реальном масштабе времени регистрируются линии уровня микроперемещений всех чувствительных элементов набора в виде спекл-интерферометрических полос, и определяют прогиб каждого  
40       чувствительного элемента по соответствующему фрагменту спекл-интерферограммы.

      Одновременное определение прогиба всей совокупности чувствительных элементов позволяет получать информацию о профиле поверхности сразу от большого числа точек, равного числу зондов. И именно использование электронной спекл-интерферограммы, регистрирующей изменение состояния всей совокупности  
45       чувствительных элементов, позволяет обеспечить одновременное определение их прогибов, пропорциональных рельефу измеряемой поверхности, т.е. определить линии уровня микроперемещений всех чувствительных элементов набора, регистрируемых на спекл-интерферограммах в виде системы разностных интерференционных полос в  
50       реальном масштабе времени.

      Данный способ опирается на принцип спекл-интерферометрической регистрации малых перемещений поверхности объекта наблюдения в форме интерферометрических полос, соответствующих линиям уровня этих перемещений (изолиний). Плотность

расположения изолиний - шаг полос - определяется длиной волны лазера спекл-интерферометра и трехмерным профилем функции распределения перемещений на поверхности наблюдения.

5 Сущность заявляемого способа определения рельефа поверхности поясняется примером реализации и графическими материалами. На фиг.1 показана принципиальная схема устройства, с помощью которого может быть реализован способ. На фиг.2 приведены изображения наборов чувствительных элементов: а - набор из 18-ти, б - из 40 консолей. На фиг.3 показаны спекл-интерферограммы изгиба балок наборов чувствительных элементов: а - из 18 балок; б, в - из 40 балок при  
10 обработке в реальном времени; г - двухэкспозиционная обработка состояний б и в.

Экспериментальная регистрация картины линий уровня малых перемещений на площади набора чувствительных элементов осуществляется с помощью электронного спекл-интерферометра. Одна из оптических схем такого интерферометра для  
15 регистрации нормальных перемещений наблюдаемой поверхности, построенная подобно схеме Майкельсона, представлена на фиг.1 (цифрой 1 обозначен лазер, 2 - коллиматор, 3 - полупрозрачное делительное зеркало, 4 - диффузно-отражающая неподвижная пластина, 5 - видеокамера, 6 - поверхность объекта наблюдения; стрелками показаны направления лучей).

Луч лазера 1, проходя через стеклянную матовую пластину 2, равномерно освещает полупрозрачное зеркало 3, расположенное под углом 45 градусов к падающему лучу. Это зеркало делит падающий на него световой поток на проходящий (опорный луч) и  
25 отраженный (предметный луч), направляемый на поверхность объекта наблюдения 6. Опорный луч, отразившись от неподвижного зеркала 4, снова попадает на делительное зеркало 3, а затем - в видеокамеру 5. Предметный луч, отразившись от поверхности 6 и пройдя через делительное зеркало 3, также попадает в видеокамеру. Интерференция предметного и опорного лучей создает спекл-картину, которая  
30 регистрируется видеокамерой, передается в ЭВМ и запоминается как опорный кадр.

Происходящие после записи опорного кадра микроперемещения поверхности объекта наблюдения отображаются на непрерывно транслируемой в ЭВМ спекл-картине и могут быть сравнены с исходным состоянием, зафиксированным в опорном кадре. В результате покадрового вычитания матрицы исходной спекл-картины из  
35 матрицы текущего состояния образуется спекл-интерферограмма, в том числе - динамическая - в режиме реального времени: места поверхности объекта наблюдения, нормальные перемещения которых отсутствовали либо были близки целому числу полуволин лазера, выглядят на ней как темные полосы; напротив, места поверхности, перемещения которых близки полуцелому числу полуволин лазера, выглядят как  
40 светлые полосы.

В качестве объекта наблюдения может быть задан набор чувствительных элементов в виде гребенки близко расположенных друг к другу, но не контактирующих между собой (вне заделки) тонких упругих полосок-консолей. На  
45 фиг.2а, б изображены такие наборы на площади 2×2 см (а - набор из 18-ти консолей, б - из 40). При таком расположении консольных чувствительных элементов изгибные перемещения отдельных консолей не влияют на перемещения соседних консолей, и в то же время отображение их перемещений в виде линий уровня при спекл-интерферометрическом наблюдении за всей гребенкой чувствительных элементов  
50 регистрируется как часть общей интерференционной картины, охватывающей все консоли. В результате с помощью единственного оптического считывателя информации - разностной спекл-интерферограммы - одновременно регистрируются

данные с большого числа датчиков, равного числу консолей в гребенке (мультисенсоре).

На фиг.3а приведена одна из спекл-интерферограмм для 18-ти балочного мультисенсора, полученная при изгибе составляющих его консолей, вызванном  
 5 одновременно приложенными, но различными воздействиями на каждую из балок; величины этих воздействий определяются по числу полос вдоль консолей. На фиг.3б, в представлены спекл-интерферограммы, выделенные из интерферограммы реального времени при последовательно нарастающих воздействиях на группы консолей в  
 10 случае 40-балочного мультисенсора. На этих спекл-интерферограммах зарегистрированы два состояния, достаточно отдаленных по времени от исходного, в результате чего полосы на некоторых балках неразличимы. Для выявления различий в состояниях, изображенных на этих рисунках, параллельно с обработкой в реальном времени делается двухэкспозиционная обработка интерферограмм (т.е. двух  
 15 последовательных состояний, разделенных сравнительно небольшим временным промежутком), результат которой для состояний, изображенных на фиг.3б, в, представлен на фиг.3 г. По этому изображению видно, что между состояниями, отображенными на фиг.3б и фиг.3в, произошли заметные перемещения по верхней  
 20 группе балок при относительной неподвижности нижней группы балок, что является информацией об изменениях сил, воздействующих на эти группы балок между двумя зафиксированными положениями набора чувствительных элементов при его движении вдоль изучаемой поверхности, т.е. об изменениях профиля поверхности под данной группой балок.

25 Расчет перемещений  $w_j$  концов каждой балки мультисенсора и величин воздействующих на них сил  $Q_j$  производится по формулам

$$w_j = n_j \frac{\lambda}{2}, Q_j = 3w_j \frac{EI}{l^3},$$

30  $j=1, 2, \dots, N$

где  $\lambda$  - длина полуволны лазера,  $n_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) - число темных полос, зарегистрированное на балке,  $l$  - длина балки,  $EI$  - жесткость балок на изгиб,  $N$  - число балок мультисенсора.

35 Этот расчет позволяет определять перемещения концов балок с субмикронной точностью. При необходимости данный расчет, а следовательно, и величины сил взаимодействия кантилеверов с изучаемой поверхностью могут быть уточнены по алгоритму, учитывающему не только число полос, но и их расположение, описанному в патенте RU №2359221 [5]. При таком расчете чувствительность мультисенсора по  
 40 перемещениям балок-консолей повышается до величин порядка 1 нм.

#### Формула изобретения

Способ определения рельефа поверхности, включающий перемещение вдоль  
 45 исследуемой поверхности набора чувствительных элементов и регистрацию их показаний, пропорциональных изменениям рельефа, отличающийся тем, что чувствительные элементы выполняют упругими, не контактирующими друг с другом и плотно заполняющими область плоскости над исследуемым участком поверхности, размещают их в поле зрения спекл-интерферометра, регистрируют в качестве опорной  
 50 спеклограмму чувствительных элементов до начала их перемещения вдоль исследуемой поверхности и их спеклограмму в каждый момент времени в процессе перемещения, сравнивают эти спеклограммы путем вычитания и по полученной в результате сравнения спекл-интерферограмме, на которой одновременно в реальном

масштабе времени регистрируются линии уровня микроперемещений всех чувствительных элементов набора в виде спекл-интерферометрических полос, и определяют прогиб каждого чувствительного элемента по соответствующему фрагменту спекл-интерферограммы.

5

10

15

20

25

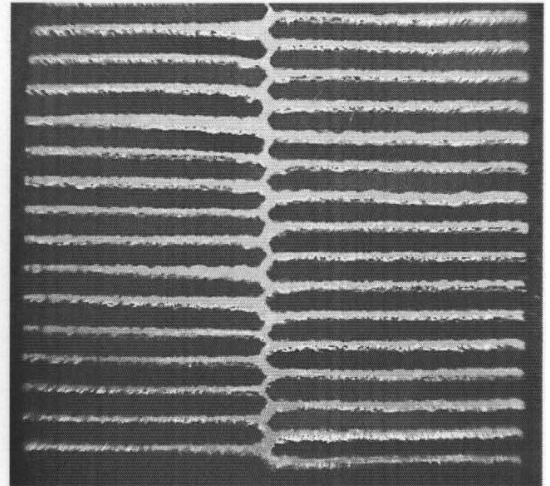
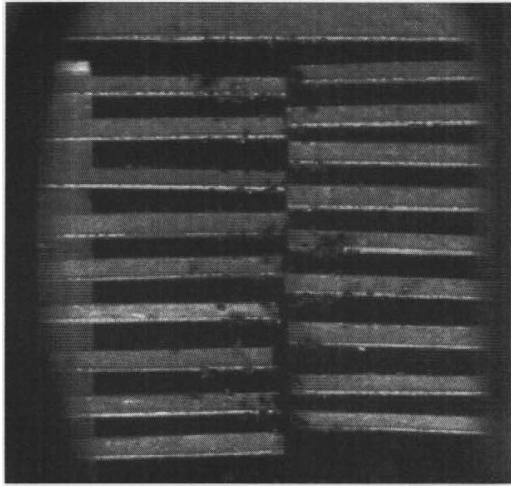
30

35

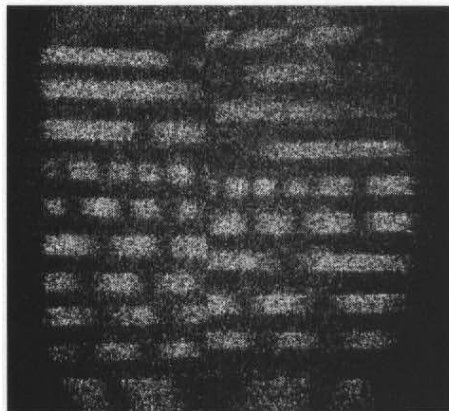
40

45

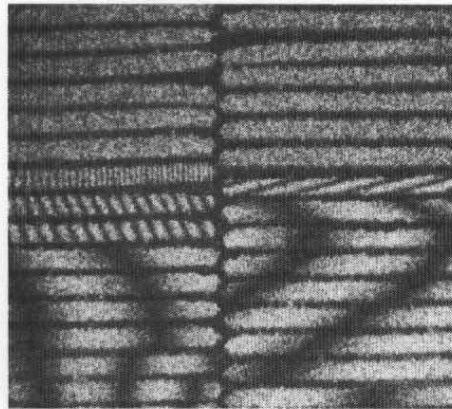
50



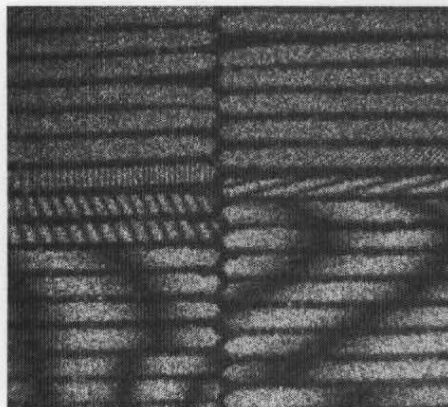
Фиг. 2



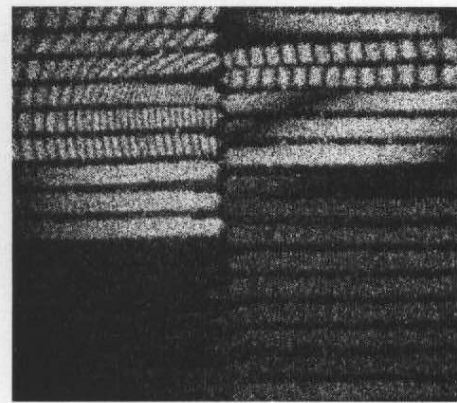
а



б



в



г

Фиг. 3